

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME, ISE

DURCHFÜHRBARKEITSSTUDIE

Zur Ermittlung möglicher Forschungs- und Demonstrationsfelder für Agri-Photovoltaik in Baden-Württemberg



ABSCHLUSSBERICHT

Oliver Hörnle (Fraunhofer ISE), Julia Riedelsheimer (Fraunhofer ISE), Max Trommsdorff (Fraunhofer ISE), Tobias Keinath (Fraunhofer ISE), Florian Binder (Staatliches Weinbauinstitut Freiburg), Ernst Weinmann (Staatliches Weinbauinstitut Freiburg), Frederik Klodt (Staatliches Weinbauinstitut Freiburg), Dr. Sabine Zikeli (Universität Hohenheim), Lisa Pataczek (Universität Hohenheim), Dr. Franz Rueß (LVWO Weinsberg), Dr. Kirsten Köppler (LTZ Augustenberg), Dr. Michael Glas (LTZ Augustenberg), Dr. Ulrich Mayr (KOB Bavendorf), Prof. Dr. Michael Frey (Hochschule Kehl), Volker Kromrey (Bodensee-Stiftung), Dimitri Vedel (Bodensee-Stiftung), Prof. Dr. Alexandra Klein (Universität Freiburg)

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE
in Freiburg im Breisgau.

Projektnummer: 54-8216.15-APV

Datum: 31. Juli 2021

Projektpartner: BayWa r.e., Bio Weingut Nopper Baden, Blaser Obst, Bodensee Stiftung, Der Lindenbrunnenhof., Goldbeck Solar, Hep, Hochschule Kehl, Intech, KOB Bavendorf, LTZ Augustenberg, Mein Solar, Ministerium für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg, Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Next2Sun, Oberschwäbische Elektrizitätswerke, Obst & Beerenanbau Schwehr, Obstgut Vollmer Nussbach, Obsthof Bernhard Kressbronn, Regionalverband Bodensee-Oberschwaben, Regionalverband Südlicher Oberrhein, Schlaich Bergermann Partner, Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein und Obstbau Weinsberg, Staatliches Weinbauinstitut Freiburg, Stadtwerke Waldkirch, Technischen Werke Schussental, TubeSolar, Universität Freiburg, Universität Hohenheim

Kontaktdaten

Oliver Hörnle

Heidenhofstraße 2, 79110 Freiburg

+49 761 / 45 88-2501

oliver.hoernle@ise.fraunhofer.de

Inhalt

1	
Abbildungen	9
2	
Tabellen	11
3	
Abkürzungen	12
1	
Hintergrund	14
1.1	
Stand der Wissenschaft und Technik	15
1.2	
Internationale Marktentwicklung der Agri-PV	17
1.3	
Innovationsausschreibungen im EEG 2021	17
2	
Rahmenprogramm.....	18
2.1	
Projektleitung und Koordination der Teilprojekte	19
2.2	
Wissensmanagement und Datenanalyse	23
2.3	
Weiterentwicklung Simulationstool Agri-Pv	23
2.4	
Analysen PV-Module, Entwicklung und Demonstration verschiedener Unterkonstruktionstypen	23
2.5	
Akzeptanzforschung und Bürgerbeteiligung	24
2.6	
Anforderungen an den genehmigungs- und förderrechtlichen Rahmen	25
2.7	
Ökologie und Nachhaltigkeit	31
2.8	
Wirtschaftlichkeitsanalysen	32
2.9	
Übertragung der Projektergebnisse auf Bundesebene	33
2.10	
Öffentlichkeitsarbeit und Wissenstransfer	34
3	
Teilprojekt Kernobst.....	35
3.1	
Ziele	35
3.1.1	
Gesamtziel des Vorhabens.....	35
3.1.2	
Beschreibung & Ziele aller Partner.....	36

3.1.2.1	
Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB)	36
3.1.2.2	
Technischen Werke Schussental (TWS)	37
3.1.2.3	
Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ Augustenberg)	37
3.1.2.4	
Goldbeck Solar	37
3.1.2.5	
Obsthof Hubert Bernhard	38
3.1.2.6	
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)	38
3.1.3	
Projektkoordination	39
3.2	
Stand der Wissenschaft und Technik	39
3.2.1	
Agri-PV Anlagen im Kernobstanbau	39
3.2.2	
Vergleichbare Versuche	40
3.3	
Potentialanalyse	42
3.4	
Standort Bavendorf	42
3.4.1	
Forschungskonzept und Innovationsgrund	42
3.4.2	
Machbarkeit	44
3.4.2.1	
Umsetzungsvorschlag	44
3.4.2.2	
Technische Machbarkeit	45
3.4.2.3	
Wirtschaftliche Machbarkeit	45
3.4.2.4	
Risikobewertung	46
3.5	
Standort Augustenberg	46
3.5.1	
Forschungskonzept und Innovationsgrad	46
3.5.2	
Machbarkeit	48
3.5.2.1	
Umsetzungsvorschlag	48
3.5.2.2	
Technische Machbarkeit	50
3.5.2.3	
Wirtschaftliche Machbarkeit	56
3.5.2.4	
Risikobewertung	61
3.6	
Standort Kressbronn – Praxisanlage	63
3.6.1	
Machbarkeit	63

4		
Teilprojekt Beerenobst	.....	65
4.1		
Ziele	.....	66
4.1.1		
Gesamtziel des Vorhabens	.....	66
4.1.2		
Beschreibung & Ziele aller Projektpartner	.....	66
4.1.2.1		
Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau (LVWO)	.....	66
4.1.2.2		
Obst- und Beerenanbau Schwehr	.....	67
4.1.2.3		
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)	.....	67
4.1.3		
Projektkoordination	.....	67
4.2		
Stand der Wissenschaft	.....	68
4.3		
Potenzialanalyse	.....	69
4.4		
Standort Heuchlingen	.....	70
4.4.1		
Forschungskonzept und Innovationsgrad	.....	70
4.4.2		
Machbarkeit	.....	71
4.4.2.1		
Umsetzungsvorschlag	.....	71
4.4.2.2		
Technische Machbarkeit	.....	71
4.4.2.3		
Wirtschaftliche Machbarkeit	.....	72
4.4.2.4		
Risikobewertung	.....	73
4.5		
Standort Waldkirch – Praxisanlage	.....	73
5		
Teilprojekt Steinobst	.....	75
5.1		
Ziele	.....	75
5.1.1		
Beschreibung & Ziele aller Projektpartner	.....	75
5.1.1.1		
Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ Augustenberg)	.....	75
5.1.1.2		
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)	.....	75
5.1.1.3		
Obsthof Vollmer/Intech GmbH & CoKG	.....	75
5.1.1.4		
Andreas Blaser	.....	76
5.2		
Stand der Wissenschaft und Technik, bisherige Arbeiten	.....	76
5.3		
Potentialanalyse	.....	76

5.4	
Standort Senglingen – Praxisanlage	76
5.5	
Standort Nußbach – Praxisanlage	77
5.5.1	
Forschungskonzept und Innovationsgrad.....	77
5.5.2	
Machbarkeit	78
5.5.2.1	
Technische Machbarkeit.....	78
5.5.2.2	
Wirtschaftliche Machbarkeit	79
5.5.2.3	
Risikobewertung.....	79
6	
Teilprojekt Acker- und Gemüsebau	80
6.1	
Ziele	80
6.1.1	
Gesamtziel des Vorhabens.....	80
6.1.2	
Beschreibung & Ziele aller Projektpartner.....	81
6.1.2.1	
Universität Hohenheim und Standort der Versuchsstation »Ihringer Hof«	81
6.1.2.2	
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)	82
6.1.2.3	
Landwirtschaftliches Technologiezentrum (LTZ Augustenberg)	82
6.1.2.4	
TubeSolar AG und Schlaich Bergermann Partner (sbp)	83
6.1.2.5	
Next2Sun GmbH	83
6.1.2.6	
Lindenbrunnenhof.....	84
6.1.2.7	
Hofgemeinschaft Heggelbach.....	84
6.2	
Stand der Wissenschaft und Technik	85
6.3	
Potenzialanalyse	87
6.4	
Standortübergreifende Organisation und Machbarkeit des Teilprojektes.....	88
6.4.1	
Projektkoordination und Arbeitspakete.....	88
6.5	
Standort Ihringer Hof	91
6.5.1	
Forschungskonzept und Innovationsgrad.....	91
6.5.2	
Machbarkeit	92
6.5.2.1	
Organisatorische und zeitliche Machbarkeit.....	92
6.5.2.2	
Technische Machbarkeit.....	94

6.5.2.3	
Wirtschaftliche Machbarkeit	95
6.5.2.4	
Risikobewertung.....	95
6.6	
Standort Lindenbrunnenhof.....	96
6.6.1	
Forschungskonzept und Innovationsgrad	96
6.6.2	
Machbarkeit	100
6.6.2.1	
Organisatorische und zeitliche Machbarkeit.....	100
6.6.2.2	
Technische Machbarkeit	101
6.6.2.3	
Wirtschaftliche Machbarkeit	103
6.6.2.4	
Risikobewertung.....	109
6.7	
Standort Heggelbach	110
6.7.1	
Forschungskonzept und Innovationsgrad	110
6.7.2	
Machbarkeit	110
6.7.2.1	
Organisatorische und zeitliche Machbarkeit.....	110
6.7.2.2	
Technische Machbarkeit	111
6.7.2.3	
Wirtschaftliche Machbarkeit	111
6.7.2.4	
Risikobewertung.....	111
7	
Teilprojekt Weinbau	112
7.1	
Ziele	113
7.1.1	
Gesamtziel des Vorhabens.....	113
7.1.2	
Beschreibung & Ziele aller Projektpartner	115
7.1.2.1	
Staatliches Weinbauinstitut Freiburg (WBI).....	115
7.1.2.2	
Christoph Vollmer	115
7.1.2.3	
Stadt Vogtsburg	116
7.1.2.4	
Fa Intech.....	116
7.1.2.5	
Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)	116
7.1.3	
Projektkoordination und Arbeitspakete.....	116
7.2	
Stand der Wissenschaft und Technik und bisherige Arbeiten	117

7.3	Potenzialanalyse	119
7.4	Standort Blankenhornsberg	120
7.4.1	Forschungskonzept und Innovationsgrad.....	120
7.4.2	Machbarkeit	123
7.4.2.1	Umsetzungsvorschlag	123
7.4.2.2	Technische Machbarkeit	126
7.4.2.3	Wirtschaftliche Machbarkeit	131
7.4.2.4	Risikobewertung.....	136
7.5	Standort Oberkirch-Bottenau.....	137
7.5.1	Forschungskonzept und Innovationsgrad.....	137
7.5.2	Machbarkeit	137
7.5.2.1	Organisatorische und zeitliche Machbarkeit.....	137
7.5.2.2	Technische Machbarkeit	137
7.5.2.3	Risikobewertung.....	138
7.6	Standort Vogtsburg	138
7.6.1	Forschungskonzept und Innovationsgrad.....	138
7.6.2	Machbarkeit	139
7.6.2.1	Organisatorische und zeitliche Machbarkeit.....	139
7.6.2.2	Technische Machbarkeit	139
7.6.2.3	Wirtschaftliche Machbarkeit	139
8	Literaturverzeichnis.....	141
9	Anhang A	146
10	Anhang B.....	156

1

Abbildungen

Fig. 1	Agri-PV Forschungsanlage auf Flächen der Hofgemeinschaft Heggelbach (Quelle: BayWa r.e.)	15
Fig. 2	Zeit- und Aufgabenplanung des Rahmenprogramms.	18
Fig. 3	Der Ablauf eines privilegierten Bauverfahrens	27
Fig. 4	Links: VÖEN- System über der Apfelsorte Topaz; Rechts: Ausfärbung der Früchte 2017. (Quelle: KOB).....	40
Fig. 5	Photosynthetisch aktive Strahlung unter Hagelschutznetz (Kontrolle – durchgezogene Linie) und Folie (VOEN - gestrichelte Linie).	41
Fig. 6	Lageplan und erste Skizze des Versuchsaufbaus am Standort Bavendorf.	43
Fig. 7	beispielhafte Darstellung eines geschlossenen (links) und eines nachgeführten (rechts) Systems. (Quelle: VIRIDI).....	43
Fig. 8	Agri-PV Standort LTZ Augustenberg; 49°00'14.47'' N, 8°29'34.16'' O; Höhe ü.M.: 156 m.	47
Fig. 9	Lichtverfügbarkeit an einen Tag mit geringer Einstrahlung (06.05.), mit durchschnittlicher Einstrahlung (28.05.) und mit hoher Einstrahlung (28.05.).....	53
Fig. 10	Oben: Simulierte Ausrichtungswinkel der Varianten "EW-Track-AT" und »EW-Track«, sowie simulierte PAR-Levels auf Pflanzenebene je nach System; Unten: Leistungsverlauf der verschiedenen Systeme.	54
Fig. 11	Ertragsmodell »pear« für Birne mit Daten aus Willockx et al. (2020).	57
Fig. 12	Lage des Landwirtschaftsbetrieb Hubert Bernhard in Kressbronn. Das ausgewählte Feld ist rot eingerahmt.	63
Fig. 13	voraussichtliche Lage der Agri-PV Fläche (rot) in Heuchlingen.	71
Fig. 14	Skizze des ersten Agri-PV-Entwurfs (Quelle: MKG Göbel).	72
Fig. 15	Illustration, wie die Anlage am Standort Heuchlingen aussehen könnte (Quelle: MKG Göbel).	72
Fig. 16	Evaluiertes Standort für die Agri-PV Anlage beim Obsthof Schwehr.	74
Fig. 17	Ausweichflächen für die Agri-PV Anlage am Standort Schwehr in Waldkirch.	74
Fig. 18	Standortvorschlag in Senglingen.	77
Fig. 19	Pilotanlage der Firma TubeSolar (Foto: TubeSolar).	86
Fig. 20	Beschattung der Reihenzwischenräume am Nachmittag auf der Agri-PV-Anlage von Next2Sun in Dirmingen (Blick von Süden nach Norden) (Foto: Next2Sun).	87
Fig. 21	Mögliche Anordnungen der Agri-PV-Anlagen auf zwei verschiedenen Flächen des Ihinger Hof der Universität Hohenheim: a) »Riech Süd«, mit den beiden Anlagen und der Referenzfläche nebeneinander, b) »Riech Süd«, mit vier Wiederholungen der Anlagen und Referenz.	92
Fig. 22	Vorgesehener Standort der Agri-PV-Anlage sowie der Referenzfläche auf dem Lindenbrunnenhof.	96
Fig. 23	Illustration des abgespannten Tragsystems von sbp mit Modularanordnungen in Ost-West-Ausrichtung.	97
Fig. 24	Oben: Simulierte Ausrichtungswinkel der Varianten "EW-Track-AT" und »EW-Track«, sowie simulierte PAR-Levels auf Pflanzenebene je nach System; Unten: Leistungsverlauf der verschiedenen Systeme.	98
Fig. 25	Illustration des ausziehbaren PV-Systems von Urban-box (Skizze: Urbanbox).	99
Fig. 26	GCR-Flexibilisierung und pflanzenverfügbare PAR beispielhaft an zwei Tagen im April.	99
Fig. 27	Agri-PV-Anlage, Hofgemeinschaft Heggelbach, Herdwangen-Schönach (Foto: BayWa r.e.).	110

Fig. 28	Heterogene Wasserverteilung in der Agri-PV Anlage der Hofgemeinschaft Heggelbach, Mai 2021.....	111
Fig. 29	Sun'Agri Agri-PV-System über Weinreben im Drahtrahmenanbausystem (Rollet, 2021).....	118
Fig. 30	Standortoptionen für Agri-PV-Systeme am Staatsweingut Freiburg – Blankenhornsberg; Schattensimulation vom 15.02.2021 um 10:17 Uhr.....	120
Fig. 31	Agri-PV-System-Platzierung auf der Versuchsfläche.....	121
Fig. 32	Illustration des Intech-Reihentrackingsystems für Agri-PV im Weinbau.....	122
Fig. 33	Oben: Simulierte Ausrichtungswinkel der Varianten "WBI-S-Track-AT" und »WBI-S-Track«, sowie simulierte PAR-Levels auf Pflanzenebene je nach System; Unten: Leistungsverlauf der verschiedenen Systeme.....	122
Fig. 34	Horizontliniendiagramm für die Flächenoption 2 am Standort Staatsweingut Freiburg.....	127
Fig. 35	Historischer Wachstumsverlauf der Weinreben anhand BBCH-Codes (Staatliches Weinbauinstitut Freiburg, 2021).....	128
Fig. 36	Kabelführung zur Kläranlage am Standort Staatsweingut Freiburg.....	130

2 Tabellen

Tabelle 1 Überblick der wichtigsten Projekttreffen der Vorstudie.	20
Tabelle 2 Allgemeine Information zum Bebauungsverfahren.....	28
Tabelle 3 Projektübersicht über die Standorte Bavendorf, Augustenberg und Kressbronn.....	39
Tabelle 4 Kostenkalkulationen des Projekts am Standort Bavendorf.	46
Tabelle 5 Anforderungen an das Lichtmanagement unter Agri-PV Anlagen für den Apfel- und Birnenanbau.	51
Tabelle 6 Designparameter verschiedener Agri-PV-Anlagentypen.....	52
Tabelle 7 Finanzielle Parameter.	56
Tabelle 8 Ergebnisse der Ertragssimulation – VB-BW als Betreiber.	56
Tabelle 9 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse; Landnutzungseffizienz (Land Equivalent Ratio = LER), Biomasse Ertrag (Biomass Yield = BMY), Preis- Leistungsverhältnis (Price Performance Ratio = PPR).	58
Tabelle 10 Förderbedarf der ausgewählten Varianten (Part I).	59
Tabelle 11 Förderbedarf der ausgewählten Varianten (Part II).	60
Tabelle 12 Kostenkalkulation des Projekts für den Standort LTZ Augustenberg.	61
Tabelle 13 Übersicht über die Standorte Heuchlingen und Waldkirch.	68
Tabelle 14 Vorläufige Kostenkalkulation am Standort.....	73
Tabelle 15 Übersicht über die Standorte Ihinger Hof, Lindenbrunnenhof, Hofgemeinschaft Heggelbach und die geplanten Agri-PV Anlagen.	89
Tabelle 16 Übersicht der Arbeitspakete des Teilprojektes.	90
Tabelle 17 Designparameter verschiedener Agri-PV-Anlagentypen.....	102
Tabelle 18 Systemkostenvergleich der Agri-PV-Optionen am Standort Lindenbrunnenhof.	105
Tabelle 19 Finanzielle Parameter am Standort Lindenbrunnenhof (LBH).	105
Tabelle 20 Ergebnisse der Ertragssimulation – LBH als Betreiber.	106
Tabelle 21 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse.	107
Tabelle 22 Förderbedarf der ausgewählten Varianten am Standort Lindenbrunnenhof.	108
Tabelle 23 Kostenkalkulation des Projekts am Lindenbrunnenhof.	109
Tabelle 24 Übersicht über die Standorte Blankenhornsberg (Staatsweingut Freiburg), Oberkirch-Bottenau und Vogtsburg.	117
Tabelle 25 Lichtmanagement-Anforderungen für Weinreben anhand BBCH Codes.	127
Tabelle 26 Designparameter verschiedener Agri-PV-Anlagentypen.....	130
Tabelle 27 Systemkostenvergleich der Agri-PV-Optionen am Standort Blankenhornsberg.	132
Tabelle 28 Finanzielle Parameter.	133
Tabelle 29 Ergebnisse der Ertragssimulation - VB-BW als Stromabnehmer.	133
Tabelle 30 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse.	134
Tabelle 31 Förderbedarf der ausgewählten Varianten.	135
Tabelle 32 Projektkosten-Vorkalkulation für den Standort Staatsweingut Freiburg.	136
Tabelle 33 Projektkosten-Vorkalkulation für den Standort Oberkirch-Bottenau.	138
Tabelle 34 Projektkosten-Vorkalkulation für den Standort Vogtsburg.	140

3 Abkürzungen

AP	Arbeitspaket
Agri-PV	Agri-Photovoltaik
AT	Antitracking
BBCH	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, das Bundesortenamt und die Chemische Industrie
BBH	Becker Büttner Held
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMY	Biomasse-Ertrag (Biomass Yield)
CAPEX	Capital expenditures
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DC	Direct current (Gleichstrom)
DIN SPEC	DIN Specification
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
EPC	Entwicklung, Beschaffung und Realisierung (Engineering, Procurement und Construction)
FAKT	Förderprogramm für Agrarumwelt, Klimaschutz und Tierwohl
FFA	Freiflächenanlage
Fg.	Fachgebiet
Fraunhofer ISE	Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
GWp	Gigawatt peak
GCR	Ground Cover Ratio (Flächenbelegungsrate)
HLRS	Hochleistungsrechenzentrum Stuttgart
IPM	Fg. Physik und Meteorologie
KOB	Kompetenzzentrum Obstbau-Bodensee
KÖLBW	Kompetenzzentrums Ökologischer Landbau Baden-Württemberg
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowatt peak
LBH	Lindenbrunnenhof
LCA	Life cycle assessment (Lebenszyklusanalyse)
LCOE	Levelized Cost of Electricity (Stromgestehungskosten)
LER	Land Equivalent Ratio (Flächennutzungseffizienz)
LK	Landkreis
LRA	Landratsamt

LSG	Landschaftsschutzgebiet
LSM	Landoberflächenmodell
LTZ Augustenberg	Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg
LVWO	Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau
MLR	Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz
MWp	Megawatt peak
O&M	Operations and Maintenance (Betrieb und Wartung)
OEW	Zweckverband Oberschwäbische Elektrizitätswerke
OGM	Obstgroßmarkt Mittelbaden
OPEX	Operational Expenditures (Betriebsausgaben)
OPV	Organische Photovoltaik
OVG	Obstversuchsgut Heuchlingen
PPR	Preis-Leistungs-Verhältnis (Price-Performance-Ratio)
PV	Photovoltaik
REF	Referenz
RVSO	Regionalverband Südlicher Oberrhein
SAM	System Advisory Model
TP	Teilprojekt
TWS	Technische Werke Schussental
UB	Urbanbox
UHO	Universität Hohenheim
UM	Umweltministerium Baden-Württemberg
VB-BW	Vermögen und Bau Baden-Württemberg
Vgl.	Vergleiche
WBI	Staatliches Weinbauinstitut Freiburg

Abkürzungen

1 Hintergrund

Die baden-württembergische Landesregierung hat sich als Ziel gesetzt, die Agri-Photovoltaik als flächeneffiziente Landnutzungsform fest zu etablieren und das Potenzial vor allem im Bereich der Sonderkulturen wie dem Obstbau gezielt zu fördern. Um dies zu erreichen, möchte die Landesregierung den Bau weiterer Pilotanlagen unterstützen.

Um Möglichkeiten der Förderung für neue Pilotanlagen über Sonderkulturen zu evaluieren, hat das Land Baden-Württemberg das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE beauftragt, zusammen mit den fünf landwirtschaftlichen Forschungseinrichtungen dem Kompetenzzentrum Obstbau-Bodensee Bavendorf (KOB), dem Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), dem Staatlichen Weinbauinstitut Freiburg (WBI), der Staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg (LVWO) und der Universität Hohenheim (UHO) eine Durchführbarkeitsstudie zur Ermittlung möglicher Forschungs- und Demonstrationsfelder für Agri-Photovoltaik in Baden-Württemberg durchzuführen. Auf ein mögliches Projektvorhaben zur Umsetzung der Forschungs- und Demonstrationsfelder wird in diesem Bericht mit dem Begriff Modellregion Agri-Photovoltaik Baden-Württemberg (Modellregion Agri-PV BaWü) Bezug genommen. Dabei ist die Modellregion Agri-PV BaWü in ein Rahmenprogramm und fünf Teilprojekte (TP) gegliedert – TP Kernobst, TP Steinobst, TP Beerenbau, TP Weinbau und TP Ackerbau. Der Aufbau des vorliegenden Abschlussberichts folgt im Wesentlichen dieser Struktur.

Die Durchführbarkeitsstudie wurde zwischen November 2020 und Ende Juli 2021 durchgeführt. In der Durchführbarkeitsstudie wurden zwölf Standorte hinsichtlich raumplanerischer, landwirtschaftlicher und technischer Aspekte geprüft und Finanzierungsmöglichkeiten evaluiert. Dabei wurden die für eine Markteinführung der Agri-PV relevantesten und vielversprechendsten landwirtschaftlichen Anwendungen sowie geeignete PV-Technologien identifiziert und konkretisiert. Neben marktüblichen PV-Modulvarianten soll der Einsatz neuer, auch speziell für Agri-PV entwickelte PV-Technologien geprüft werden, darunter organische PV-Folien, PV-Röhren und semi-transparente PV-Module.

Ziel der Durchführbarkeitsstudie ist es, relevante Forschungsfragen und Anwendungsgebiete genauer zu definieren und ein abgestimmtes Forschungs- und Umsetzungskonzept für Baden-Württemberg auszuarbeiten. Ein Schwerpunkt lag dabei auf der Akquise regionaler und überregionaler Investoren und Industriepartner. Gleichzeitig wurden Chancen für Kofinanzierungen auf Bundes- und Länderebene evaluiert. Die eigenständige Planung der Forschungs- und Demonstrationsstandorte ermöglicht dabei auch die Umsetzung einzelner Projektstandorte oder Teilprojekte. Durch eine ausgewogene Kombination aus Forschungs- und Praxisanlagen wird in der Modellregion Agri-PV BaWü eine Bandbreite an Fragestellungen in den verschiedenen Kulturen und Regionen vorgeschlagen. Neben der Untersuchung der Effekte variierender Beschattungsregime auf Wachstum und Ökophysiologie der Kulturpflanzen sind auch Forschungsaktivitäten zu den Auswirkungen des Pflanzenschutzmitteleinsatzes auf die PV-Module und die Unterkonstruktion eingeplant.

Insbesondere im landwirtschaftlichen Bereich spielt die Implementierung von Prototypen eine entscheidende Rolle. Um landwirtschaftliche Betriebe und Verbände sowie Umweltverbände in die Entwicklung einzubeziehen, wurde eng mit den wichtigsten Interessensgruppen kooperiert, u. a. durch eine entsprechende Zusammensetzung des Projektbeirates.

1.1

Stand der Wissenschaft und Technik

Land wird immer knapper – sowohl weltweit als auch in Deutschland. Neben fortschreitender Urbanisierung, Straßenbau und Gewerbeflächenbedarf nimmt auch die Energiewende landwirtschaftliche Nutzflächen in Anspruch, allen voran der einhergehende Anbau von Energiepflanzen. Ökologische und gesellschaftliche Probleme sind die Folge, darunter eine Zunahme der Landnutzungskonkurrenz und steigende Pachtpreise in der Landwirtschaft. Besonders betroffen sind Regionen, welche aufgrund fruchtbarer Böden und milden Klimas sowohl landwirtschaftlich attraktiv sind als auch wegen hoher Sonneneinstrahlung als Standort für Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) in Frage kommen. Die Flächennachfrage für PV-FFA spielt unter anderem deshalb eine immer größere Rolle, da diese mittlerweile aufgrund kontinuierlich sinkender Kosten und steigender Strompreise auch ohne EEG-Förderung wirtschaftlich sind.

Eine Möglichkeit die Flächeninanspruchnahme zur Umsetzung der Energiewende zu reduzieren, ist die Kombination von Nahrungsmittelproduktion und Energieerzeugung. Bei der Agri-Photovoltaik bleiben die landwirtschaftlichen Flächen für den Nutzpflanzenanbau größtenteils erhalten. Die Idee, Landwirtschaft mit Photovoltaik zu kombinieren, wurde bereits 1981 von Goetzberger und Zastrow (1982) entwickelt. Es dauerte allerdings mehr als 30 Jahre bis im Jahr 2016 die bisher größte deutsche Pilotanlage im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projektes APV-RESOLA (FKZ: 033L098AN) in Baden-Württemberg auf dem Demeter-Betrieb der Hofgemeinschaft Heggelbach errichtet wurde. In dem Projekt wurde auf Flächen der Hofgemeinschaft nahe Überlingen am Bodensee ein Agri-PV-Prototyp unter realen Bedingungen für den Acker- und Gemüsebau umgesetzt und dessen Einsatz wissenschaftlich begleitet, siehe Fig. 1.



Fig. 1 Agri-PV Forschungsanlage auf Flächen der Hofgemeinschaft Heggelbach (Quelle: BayWa r.e.)

Die wichtigsten Ergebnisse aus den fünf Arbeitsschwerpunkten i) Technik, ii) Agrarwissenschaft, iii) Umwelt und Biodiversität, iv) Gesellschaft und v) Politik und Ökonomie sind im Leitfaden Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende¹ zusammengefasst. Die Praxistauglichkeit der Agri-PV im Ackerbau wurde für den Standort Deutschland unter Beweis gestellt und ein Vorstandard (DIN SPEC 91434) für Agri-PV entwickelt.

Die agrarwissenschaftlichen Ergebnisse des zweijährigen Feldversuchs APV-RESOLA werden im Kapitel 6.2 (TP Ackerbau) erläutert. Generell zeigte sich in Heggelbach wie auch an anderen Pilotanlagen, dass sich die Agri-PV besonders in trockenen und heißen Jahren, oder in allgemein ariden Regionen positiv auf die landwirtschaftlichen Erträge auswirken kann (Trommsdorff et al., 2021). Agri-PV-Anlagen haben demnach ein hohes Potenzial, um zur Entschärfung des Landnutzungskonfliktes zwischen Nahrungsmittelproduktion und Energieerzeugung beizutragen.

Zu den Kulturen, die bisher in Agri-PV-Anlagen untersucht und wissenschaftlich analysiert wurden, zählen Salat, Weizen, Gurken, Kartoffeln, Sellerie, Klee gras, Zuckermais, Chili und Kirschtomaten (Barron-Gafford et al., 2019; Marrou, Guillioni et al., 2013; Sekiyama & Nagashima, 2019; Trommsdorff et al., 2021; Weselek et al., 2021). Die beobachteten Effekte unterscheiden sich je nach Umweltbedingungen am Versuchstandort, dem Aufbau und Design der PV-Konstruktion und der Kulturauswahl.

Stand der Technik

Weltweit gibt es eine Vielzahl von PV-Konzepten, die mit der Landwirtschaft kombiniert werden. Nach der DIN SPEC 91434 wird die Agri-PV in zwei Kategorien unterteilt:

- Kategorie 1: hochaufgeständerte Systeme (lichte Höhe > 2,1 Meter)
- Kategorie 2: bodennahe Systeme (lichte Höhe < 2,1 Meter)

Bei hochaufgeständerten Systemen findet die Bewirtschaftung typischerweise unter den PV-Module statt. Ein solches System wurde 2016 im Rahmen des Projektes APV-RESOLA errichtet. Bei bodennahen Systemen findet die Bewirtschaftung zwischen den Agri-PV-Anlagenreihen statt. Ein Beispiel dafür ist die vertikale Anlage von Next2Sun, welche 2020 in Aasen bei Donaueschingen eingeweiht wurde. In beiden Systemen muss die bisherige landwirtschaftliche Nutzbarkeit weiter gewährleistet sein. Der Abstand der Reihen und Träger ist ebenso wie die Anlagenhöhe an die Maße der Maschinen, mit denen das Feld bewirtschaftet werden soll, anzupassen. Die genauen Kernanforderungen und Kriterien für Agri-PV-Systeme sowie weitere Empfehlungen für eine erfolgreiche Planung und Installation einer solchen Anlage sind in der DIN SPEC 91434 beschrieben.

Für ein gezieltes Lichtmanagement unterhalb der Module erscheint der Einsatz von nachgeführten PV-Modulen vielversprechend. Bei herkömmlichen nachgeführten PV-Anlagen verfolgen die PV-Module dem Tagesverlauf der Sonne und erzielen damit höhere elektrische Erträge als fixierte PV-Module. In Agri-PV-Systemen kann sich die Modulausrichtung hingegen an den Bedürfnissen der Pflanzen orientieren und beispielsweise in wichtigen Wachstumsperioden mehr Licht zur Verfügung stellen (siehe z. B. Valle et al. (2017)).

¹ <https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/agri-photovoltaik-chance-fuer-landwirtschaft-und-energiewende.html>

1.2 Internationale Marktentwicklung der Agri-PV

Weltweit hat Japan als erstes Land Agri-PV staatlich gefördert. Unter der Federführung des japanischen Ministeriums für Landwirtschaft, Forstwirtschaft und Fischerei wurde als Antwort auf die Nuklearkatastrophe von Fukushima im April 2013 ein Gesetz verabschiedet, das es fortan gestattet, PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen zu installieren, wenn weiterhin mindestens 80 Prozent der landwirtschaftlichen Erträge erreicht werden. Ziel des Gesetzes ist, den Landwirtinnen und Landwirten durch »Solar Sharing« eine Einkommensdiversifizierung zu ermöglichen, um den Rückgang der japanischen Exporte aus dem Landwirtschaftssektor, den damit verbundenen Betriebsaufgaben und der Landflucht entgegenzuwirken. In Japan wurden zwischen 2013 und 2020 insgesamt über 3000 Agri-PV-Anlagen umgesetzt. Mit großem Abstand wurden in China die bisher leistungsstärksten Agri-PV-Anlagen sowie die größte Menge installierte Agri-PV-Leistung umgesetzt. Die installierte Agri-PV-Leistung in China, die zwischen 2015 und 2018 implementiert wurde, wird auf 1.800 MWp geschätzt. Als erster Bundesstaat der Vereinigten Staaten von Amerika fördert Massachusetts die Umsetzung von Agri-PV-Anlagen. Unter der Federführung des Department of Energy Resources wurde das Solar Massachusetts Renewable Target (SMART) Förderprogramm eingeführt. Seit dem 26.11.2018 stehen in diesem Programm Förderungen für »Dual-Use: Agriculture and Solar Photovoltaics« Anlagen zur Verfügung. Die installierte Agri-PV-Leistung darf pro Projekt 2 MWp nicht überschreiten. Zudem darf in der Vegetationsphase die solare Einstrahlung unter den Agri-PV-Anlagen nicht weniger als 50 Prozent betragen.

Als erster Mitgliedstaat der EU fördert Frankreich seit 2017 Agri-PV im Rahmen regelmäßiger Ausschreibungen. In den Niederlanden wird Agri-PV als Maßnahme zur Anpassung an den Klimawandel zugelassen und finanziell gefördert. Weitere Anlagen wurden in Chile, Korea, Ägypten, Taiwan, USA und Malaysia umgesetzt. Die weltweit installierte Agri-PV-Leistung wird aktuell auf mindestens 2.4 GWp geschätzt (Schindele et al. 2020).

1.3 Innovationsausschreibungen im EEG 2021

Seit der EEG-Novelle 2021 besteht in Deutschland für Agri-PV im Rahmen der Innovationsausschreibungen die Möglichkeit, eine EEG-Einspeisevergütung zu erhalten. Für den Gebotstermin im April 2022 wurde dazu ein Segment in Höhe von 50 MWp für »besondere Solaranlagen« reserviert. Aktuell wird eine Ausweitung des Segments um weitere 100 MW diskutiert. Als »besondere Solaranlagen« im Sinne des EEG werden neben der Agri-PV (»Solaranlagen auf Ackerflächen bei gleichzeitigem Nutzpflanzenanbau auf der Fläche«) auch Parkplatz- und Floating-PV betrachtet. Welche Anforderungen an diese Anlagen im Einzelnen zu stellen sind, soll die Bundesnetzagentur bis zum 01.10.2021 bestimmen. § 37 EEG 2021 ist nicht anzuwenden, sodass die Anforderungen für die finanzielle Förderung bezüglich Flächenkulisse und Bebauungsplan nicht beachtet werden müssen. Seitens des Netzbetreibers wird für den Strom ein fester Betrag pro Kilowattstunde gezahlt, eine sog. Fixe Marktprämie. Voraussetzung ist, dass der Bieter für »seine« angebotene fixe Marktprämie den Zuschlag erhält. Der maximale Wert eines bei der Ausschreibung zugelassenen Gebots liegt bei ca. 7,43 ct/kWh. Teilnahmeberechtigt sind Anlagen mit einer installierten Leistung zwischen 100 kWp und 2 MWp, welche zudem zwingend mit anderen EEG-Anlagen gekoppelt sind. Agri-PV-Anlagen müssen daher z. B. mit einem Speicher zusammenschlossen werden. Zu beachten ist darüber hinaus, dass der Strom grundsätzlich nicht selbst verbraucht werden darf.

planten Rahmenprogramm profitieren. Die Ergebnisse der bereits durchgeführten Anlagen- und Designplanungen werden, sofern von den Partnern zugelassen, in den Beschreibungen der Teilprojekte dargestellt.

2.1 Projektleitung und Koordination der Teilprojekte

Das AP1 des Rahmenprogramms beinhaltet sowohl die Koordination des Rahmenprogramms als auch die Abstimmung und Koordination zwischen den Teilprojekten. Im Zuge der Machbarkeitsstudie haben mehrere Treffen zur übergeordneten Projektkoordination stattgefunden. Diese lassen sich grob in Gesamtprojekttreffen, Teilprojekttreffen und standortbezogene Besprechungen unterteilen:

Durch **regelmäßige Teilprojekttreffen** wurde der Austausch der Partner sichergestellt. In Projekttreffen zwischen den wissenschaftlichen Partnern sowie der landwirtschaftlichen und technischen Praxispartnern konnten Forschungsfragen entwickelt und die Planung der PV-Systeme sowie der landwirtschaftlichen Nutzung konkretisiert werden. Eine chronologische Darstellung der wichtigsten Treffen und deren Inhalte ist Tabelle 2 zu entnehmen. Insgesamt fanden im Zuge der Vorbereitung der Modellregion weit über 300 Gespräche statt. Die Ergebnisse aus den einzelnen Teilprojekten werden im Kapitel »1. Teilprojekte« genauer dargestellt.

In **standortbezogenen Treffen** wurde die Standorte hinsichtlich der Testfläche, des Genehmigungsrechts und der Anforderungen an die Agri-PV-Systeme und die technischen Risiken bewertet. Trotz der eingeschränkten Kontakt- und Reisemöglichkeiten der zweiten und dritten Corona-Wellen konnten Vor-Ort-Besichtigungen an den Forschungsstandorten Blankenhornsberg (WBI Freiburg), Heuchlingen (LVWO Weinsberg) und am Augustenberg (LTZ Augustenberg) sowie an den Praxisstandorten in Waldkirch (Obstbau Schwehr), Riegel-Forchheim (Lindenbrunnenhof), Nußbach/Oberkirch (Wein- und Obstbau Vollmer) und in Kressbronn (Obstbau Bernhard) durchgeführt werden.

Die beiden **Gesamtprojekttreffen** im Januar und Juli 2021 dienten dem allgemeinen Kennenlernen, dem Austausch zwischen den Teilprojekten und organisatorischen Absprachen. Darüber hinaus wurde in einem regelmäßigen E-Mail-Verteiler auf neue Ergebnisse aufmerksam gemacht u. a. relevante Informationen aus den Gesprächen mit den Regierungspräsidien, Vermögen und Bau, den Landes- und Bundesministerien (UM, MLR, BMEL, BMWi und BMBF). Auch Erfahrungen und offene Fragen aus den einzelnen Teilprojekten wurden diskutiert und ein gemeinsamer Zeit- und Budgetplan sowie Arbeitspakete definiert.

Die **Gespräche mit den Regierungspräsidien** halfen bei der ersten Einschätzung der notwendigen Genehmigungsschritte und des zeitlichen Rahmens der Umsetzung der Agri-PV-Anlagen. Bislang mussten Agri-PV-Anlagen im Außenbereich i.d.R. eine »reguläre« Bauleitplanung mit der Aufstellung eines vorhabenbezogenen Bebauungsplans und entsprechender Änderung des Flächennutzungsplans durchlaufen. Im Rahmen des Projektes erfolgte bereits der Austausch mit dem Regierungspräsidium Freiburg über das Vorgehen im Projekt. Am 27.07.2021 fand eine digitale Veranstaltung des RP Freiburg zu »Freiflächensolaranlagen und Landwirtschaft« statt, bei der das Fraunhofer ISE an den Diskussionen beteiligt war und einen Vortrag über Agri-PV gehalten hat. Anwesend waren über 100 Vertreter von Kommunen, Landratsämtern, Regionalverbänden, Landwirtschaftsverbänden und der Solarbranche, darunter mehr als 50 Oberbürgermeister. Das Interesse und der Gesprächsbedarf waren so groß, dass das Format verstetigt oder wiederholt werden soll. Ein weiteres Ergebnis ist die voraussichtliche Aufnahme zweier Landkreise aus BW in eine Potenzialstudie des Fraunhofer ISE. In dieser sollen die Flächenpotenziale für Agri-PV detailliert bewertet werden. Der Austausch mit

den Regierungspräsidien Karlsruhe, Stuttgart und Tübingen erfolgte durch das RP Freiburg. Eine Anfrage des RP Karlsruhe für einen vergleichbaren Termin zu dem des RP-Freiburg ist eingegangen und angenommen. Unter gewissen Voraussetzungen scheint die Umsetzung als privilegiertes Bauvorhaben im Außenbereich machbar, der Regelfall dürfte jedoch die beschriebene Bauleitplanung bleiben. Ziele der Gespräche mit den Regierungspräsidien waren u. a. die Informationsweitergabe an die zuständigen Behörden und die Etablierung einer landesweit möglichst einheitlichen Genehmigungspraxis.

Durch den **Austausch mit Jens Vollprecht von der Rechtsanwaltskanzlei BBH** konnten weitere genehmigungsrechtlichen Fragen evaluiert werden. Nach dem aktuellen Stand des Baugesetzbuches ist Voraussetzung für eine Privilegierung von Agri-PV-Anlagen nach §35 BauGB eine nachweislich dienende Funktion für die Landwirtschaft. So wäre es z. B. durch einen vorwiegenden Eigenverbrauch des Stroms von mindestens 66 Prozent vorstellbar, die Anforderungen der dienenden Funktion zu erfüllen. Eine weitere Möglichkeit, die dienende Funktion zu erfüllen, ist die Schutzfunktion für die landwirtschaftlichen Kulturen.

Im **Austausch mit den Landesministerien UM und MLR** wurden verschiedene Finanzierungsoptionen des Projektes diskutiert. Aufgrund des hohen Investitionsvolumen sollte in der Planungsphase des Projektes ein Schwerpunkt auf die Akquise von Industriepartnern und weiteren Projekten gelegt werden und verschiedene Kofinanzierungsoptionen geprüft werden. Im weiteren Planungs- und Projektverlauf wurden die wichtigsten Schritte in enger Abstimmung mit dem UM und MLR vorgenommen.

Tabelle 1 Überblick der wichtigsten Projekttreffen der Vorstudie.

Datum	Art des Treffens	Besprochene Inhalt
08.10.2020	Projekttreffen Forschungs-partner (Digitaler Kickoff APV 5+5)	-Stand der Beauftragungen -Genehmigungsverfahren -Forschungsrahmen -Betreuung der Praxisstandorte
04.11.2020	Ackerbau – Teilprojekttref-fen	-Standortabsprache: Heggelbach und Ihinger Hof -Definierung der Forschungsfragen und der Feldversuche -Planung der landwirtschaftlichen Nutzung -Kostenabschätzung und Finanzierung
05.11.2020	Treffen mit MLR und UM Baden-Württemberg	-Besprechung Finanzierungsoptionen
05.11.2020	Teilprojekttreffen – Kern-obst	-Absprache zu weiterem Partner und Strom-abnehmer am Standort LTZ -Modell zum Eigenstromverbrauch -Klärung der Eigentümerschaft und Baugenehmigung

06.11.2020	Treffen Teilprojektleitungen	-Projektbeirat -Skizzenüberarbeitung -Stromabnahme und Anlagendesign
16.11.2020	Ackerbau – Teilprojekttreffen	-Aktueller Projektstand -Forschungsfragen -Technisch Möglichkeiten
16.11.2020	Austausch Regierungspräsidium	-Baugenehmigung und Bauleitplanung -Besprechung der Möglichkeiten der Privilegierung nach § 35 Abs. 1 BauGB
17.11.2020	Beerenbau – Teilprojekttreffen	-Besprechung der Standortauswahl -Technische Lösungen und organische PV -Stromabnahme -Aufwandseinschätzung und Zeitplan
17.11.2020	Kernobst – Teilprojekttreffen	-Aktueller Projektstand -Baugenehmigung -Eigentümerschaft -Forschungsfragen
20.11.2020	Treffen Teilprojektleitungen	-Updates aus den Teilprojekten -Updates Rahmenprogramm -Stromabnahme / Einspeisung -Zeitraumen und Budgetplanung
02.12.2020	Projekttreffen Rahmenprogramm	-Planung eines Biodiversitäts- und Umwelt-Konzeptes -Bürgerbeteiligung und Stakeholder-Prozesse -Zeit- und Budgetplanung
09.12.2020	Treffen Teilprojektleitungen	-Updates Teilprojekte -Updates Vermögen und Bau sowie Minister-schreiben an BMEL, BMWi und BMBF -Besprechung von Industriepartnern / Projektierern -Besprechung der Vorskizze: Rahmenprogramm und Teilprojekte

13.01.2021	Kernobst – Teilprojekttreffen	-Absprache mit Projektierer: Hep global -Analyse der Anforderungen an Agri-PV-Systeme im Obstbau
19.01.2021	Gesamtprojekttreffen	-Vorstellung Projektstruktur: Rahmenprogramm und Teilprojekte -Aktueller Stand der Planung -Abstimmung des Zeitplans
09.02.2021	Projekttreffen Rahmenprogramm	-Updates zum Gesamtprojekt -Sammlung von Forschungsfragen -Akzeptanzforschung -Zeit- und Budgetplanung
16.03.2021	Weinbau – Teilprojekttreffen	-Update Projektfortschritt -Definierung von Forschungsfragen -Absprache zu technischen Partnern / EPC -Kostenabschätzung
14.04.2021	Ackerbau – Teilprojekttreffen	-Finanzierung der Anlage -Eigentumsrechte der Anlage -Forschungsansätze und -fragen
11.05.2021	Steinobst – Teilprojekttreffen	-Raumordnerische Bedenken -Klärung von Eigentumsrechten der Anlage -Vorbereitung Bauleitplanverfahren -Schutzfunktion der Anlage und Ergänzung mit Insekten-Schutznetzen
19.05.2021	Treffen Teilprojektleitungen	-Innovationsausschreibung und EEG -Diskussion über Antragsablehnung des BMBF und weiteres Vorgehen im Projekt »Modellregion«
19.05.2021	Treffen mit MLR und UM Baden-Württemberg	-Innovationsausschreibung und EEG -Diskussion über Antragsablehnung des BMBF und weiteres Vorgehen im Projekt »Modellregion« -Weiteres Vorgehen für den Abschlussbereich

Die Forschungspartner einigten sich auf die grundsätzliche **Zusammensetzung des Projektbeirats** für die Modellregion mit 8-10 Personen. Für diesen sollen Vertreterinnen und Vertreter landwirtschaftlicher Verbände, aus Politik und Wissenschaft, der Energiewirtschaft sowie zwei Vertreterinnen und Vertreter der baden-württembergischen Ministerien MLR und UM berufen werden.

2.2

Wissensmanagement und Datenanalyse

Im weltweit dynamisch wachsenden Agri-PV-Markt wurden bereits hunderte Anlagen gebaut und unter verschiedensten klimatischen, landwirtschaftlichen und technischen Kontexten betrieben. Dieser Erfahrungsschatz ist bisher für deutsche Stakeholder allerdings kaum zugänglich. Um diesen zu erschließen und den Kenntnisstand effizient und schnell zu erweitern, soll im AP2 des Rahmenprogramm eine globale Anlagendatenbank erstellt und hinsichtlich der Relevanz für mitteleuropäische Klimazonen ausgewertet werden. Zugleich wird in AP2 das technische und wirtschaftliche Flächenpotenzial für Baden-Württemberg und Deutschland abgeschätzt.

Hierzu wurden im Rahmen der Machbarkeitsstudie bereits erste Literaturrecherchen durchgeführt, welche als Grundlage für weitere Metastudien und zur Integration in die Anlagendatenbank verfügbar sind.

2.3

Weiterentwicklung Simulationstool Agri-Pv

Im Rahmen des AP3 der Modellregion Agri-PV BaWü soll bei der Entwicklung von Strahlungssimulationen und der Modellierung der landwirtschaftlichen Erträge das zentrale Wissensmanagement zu einer Vereinfachung von Arbeitsabläufen und einem verbesserten Datenmanagement beitragen. In Rahmenprogramm sollen dazu die bereits in Entwicklung befindlichen, aber auf Ackerkulturen beschränkten Simulationsmodelle des Fraunhofer ISE, für Sonderkulturen weiterentwickelt werden. Die weiterentwickelten Modelle sollen Nutzern in Form einer Web-Anwendung mit User-Interface zur Verfügung gestellt werden, um landwirtschaftliche und elektrische Erträge von Agri-PV-Anlagen abschätzen zu können.

2.4

Analysen PV-Module, Entwicklung und Demonstration verschiedener Unterkonstruktionstypen

Im PV-Markt gibt es eine Vielzahl an neuartigen Modultechnologien, die hinsichtlich der Anforderungen im Bereich Agri-PV und in puncto Ressourcenschonung vorteilhaft gegenüber klassischen PV-Technologien sind. Um deren Praktikabilität in einer Agri-PV-Anlage zu untersuchen, sollen in AP4 kleinskalige Versuche mit neuartigen, innovativen Modultypen und beispielhaften Pflanzen durchgeführt werden. Neben den Modulen spielt die Gestaltung der Unterkonstruktion eine ausschlaggebende Rolle für den Erfolg des Systems. Analog zu den Modulversuchen soll auch hier im kleinskaligen Bereich an neuartigen Aufständern geforscht werden.

Im Grünland und im Ackerbau können bodennahe Systeme besonders kostengünstig installiert werden, während im Gartenbau tendenziell aufwändigere Systeme mit Sondermodulen oder nachgeführten PV-Systemen sinnvoll erscheinen. Bei hochpreisigen Kulturen kann der höhere Kostenaufwand der PV durch die optimierten Wachstumsbedingungen auf landwirtschaftlicher Seite gerechtfertigt werden.

Besonders vielversprechend erscheinen nachgeführte PV-Systeme, welche flexibel auf die Lichtansprüche der Kulturen reagieren können, sowie perspektivisch organische PV-Folien, welche unterschiedliche Transparenzgrade ermöglichen und, ähnlich wie herkömmliche Folien im geschützten Anbau, in bestehende Systeme der Landwirtschaft integriert werden können.

Um ein möglichst synergetisches Agri-PV-System zu entwickeln, wurden im Rahmen der Machbarkeitsstudie bilaterale Gespräche mit Vertreterinnen und Vertretern der Landwirtschaft und den zuständigen Forschungsinstituten geführt, um die Systeme auf die Bedürfnisse der landwirtschaftlichen Kulturen abzustimmen. Seitens des Fraunhofer ISE wurden aktuelle Angebote des PV-Marktes ausgewählt und den Projektpartnern präsentiert. Aus den jeweiligen Standortbedingungen und der Marktsituation konnten erste Kostenabschätzungen erfolgen.

2.5 Akzeptanzforschung und Bürgerbeteiligung

Bürgerbeteiligungsprozesse erscheinen essenziell für die gesellschaftliche Akzeptanz und den Erfolg der Agri-PV. Um die gesellschaftliche Akzeptanz der Agri-PV zu untersuchen, sind in AP5 des Rahmenprogramms Visualisierungen verschiedener Agri-PV-Systeme in unterschiedlichen Einsatzbereichen und Kulturlandschaften geplant. Dabei sollen die Ergebnisse auch hinsichtlich verschiedener Modultechnologien und Materialien der Unterkonstruktionen miteinander verglichen werden, und die Anwendungen mit der höchsten Akzeptanz in die Untersuchungen möglicher Förderregime einfließen. Zudem sollen Konzepte zur Durchführung von Bürgerbeteiligungen und Informationsveranstaltungen für die Verwendung an den einzelnen Standorten erarbeitet werden. Lokal sollen Bürgerinnen und Bürger vor Ort, aber auch Stakeholder wie Naturschutzgruppen, Aktive vor Ort etc. in Workshops über das Projekt und Agri-PV informiert werden. In ein bis zwei Infoveranstaltungen pro Standort wird das Gesamtprojekt und die geplante Anlage vor Ort vorgestellt, wobei die Infomaterialien und -Plattformen, welche im AP9 »Öffentlichkeitsarbeit« erarbeitet werden, verwendet und beworben werden. Ergänzend sind Stellungnahmen/Pressemitteilungen zu den Veranstaltungen vorgesehen.

Auf regionaler Ebene organisiert die Bodensee-Stiftung die Stakeholder-Beteiligung. Vertreterinnen und Vertreter von Naturschutzorganisation, Landwirtschaftsbetrieben, landwirtschaftliche Verbände und Erzeugergemeinschaften, Landschaftserhaltungsverbände etc., aber auch von Behörden, der Stadtwerke und von Energiegenossenschaften sowie Energieagenturen, des PV-Netzwerkes oder von Regionalverbänden und nicht zuletzt Investoren werden in ca. zwei bis vier Workshops pro Region zusammengebracht.

Im Rahmen der Vorstudie wurde in einem ersten Treffen zwischen Bodenseestiftung und Fraunhofer ISE allgemein eine hohe Akzeptanz von Landwirtschaftsbetrieben und anderen Stakeholdern prognostiziert, u. a. aufgrund der zu erwartenden Einkommensdiversifikation- und Steigerung der Landwirtschaftsbetriebe und der Entschärfung der Landnutzungskonkurrenz durch den Einsatz der Agri-PV. Trotzdem bleibt die Beteiligung der lokalen Akteure ein wichtiger Baustein für die erfolgreiche Implementierung der Modellregion Agri-PV BaWü.

2.6

Anforderungen an den genehmigungs- und förderrechtlichen Rahmen

Die Anforderungen an den Rechtsrahmen und das Förderregime sind entscheidend für den Bau der Pilotanlagen in den Teilprojekten. Ausgehend vom aktuellen rechtlichen Rahmen der Agri-PV sollen im AP6 des Rahmenprogramms das Raumordnungs-, Bauleitplanungs- und Umweltrecht sowie die Ökopunkteverordnung hinsichtlich möglicher zeitlicher und finanzieller Hürden zur Umsetzung von Agri-PV untersucht und Lösungsvorschläge für Anpassungen des Rechtsrahmens erarbeitet werden. Insbesondere soll das Spannungsfeld zwischen Energiewirtschafts- und Naturschutzrecht im Bauleitplanungs- und Anlagenzulassungsrecht vertieft analysiert werden. Die dabei entstehenden Erkenntnisse sollen anwendungsorientiert dargestellt werden, um eine unmittelbare Anwendung in der Praxis zu ermöglichen. Verwaltungsrechtliche Fragestellungen, welche das Baurecht und die Bauordnung sowie das Umwelt- und Naturschutzrecht betreffen, werden von der Hochschule Kehl bearbeitet, Fragen des Energie- und Beihilfe-rechts analysiert und Förderoptionen erarbeitet.

In einem weiteren Schritt sollen auf dieser Grundlage erforderliche rechtliche Anpassungen zur Auflösung der dargestellten Normenkonflikte untersucht werden, insbesondere im Bereich des Bauleitplanungs- und Umweltrechts. Auch der Bereich der landesrechtlichen Zulassungsvorschriften in den jeweiligen Landesbauordnungen soll mitbearbeitet werden.

Die Einbindung der Regierungspräsidien Freiburg, Karlsruhe, Tübingen und Stuttgart ist zentral für die Einhaltung der Zeitplanung und für eine zeitnahe Umsetzung der notwendigen Genehmigungsverfahren. Vier der fünf Forschungsanlagen (alle außer dem Standort KOB Bavendorf) stehen auf Flächen baden-württembergischer Landesanstalten, deren Liegenschaftsverwaltung durch den Landesbetrieb Vermögen und Bau erfolgt. Insofern ist der enge Austausch sowohl mit der Betriebsleitung für die zentrale Koordination der Forschungsstandorte als auch mit den jeweilig vor Ort verantwortlichen Ämtern von Vermögen und Bau für die jeweilige Planung der Anlagen wichtig. Im Rahmen der Vorstudie wurden im November 2020 erste Gespräche mit der Betriebsleitung von Vermögen und Bau geführt. Dabei wurde zunächst eine Finanzierung der relevanten Standorte in Aussicht gestellt, welche jedoch nach Gesprächen zwischen der Betriebsleitung und dem Finanzministerium Baden-Württemberg weitgehend zurückgezogen werden musste. Nach intensiverer Prüfung wurde die Finanzierung der Pilotanlagen an den Standorten Ihinger Hof, WBI und LVWO mit Verweis auf die aktuelle Erlasslage seitens des Finanzministeriums abgelehnt. Der Standort LTZ wird derzeit noch genauer geprüft und eine Beschlussvorlage vorbereitet. Eine finale Entscheidung wird bis Ende September erwartet.

Weitergehend mussten grundsätzliche Fragen des Baurechts und Forschung im Rahmen der Vorstudie zur Modellregion geklärt werden. Die Analyse des Genehmigungsrechtes sowie der Austausch mit den Ministerien und der Rechtsanwaltskanzlei BBH hat ergeben, dass ein großes baurechtliches Verfahren zu aufwendig und langwierig wäre, um das Forschungsprojekt zielgerichtet umzusetzen. Gerade durch die notwendige Änderung des Flächennutzungsplans und durch vorhabenbezogene Bebauungspläne ist mit einem Zeithorizont von zwei bis fünf Jahren zu rechnen. Um die Verfahrensdauer abzukürzen, wurden verschiedene Lösungsansätze diskutiert:

- Ein privilegiertes Bauverfahren nach §35 BauGB anstreben, um möglichst schnell Anlagen bauen und beforschen zu können (Vorbild: Projekt APV-Obstbau in Rheinland-Pfalz).
- Eine sogenannte »Experimentierklausel« auf Landesebene einzubringen, um eine Bundesratsinitiative zu erwirken (Vorbild: aktuelle Gespräche über Klauseln zur Schaffung von Wohnraum).

- Auf veränderte Regularien seitens der Bundesregierung und des EEGs oder eine Veränderung des Baurechts v. a. hinsichtlich §35 BauGB abzuwarten.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurden diese Forschungsfragen und Konzepte zusammen mit den zuständigen Behörden diskutiert. Auf eine Änderung der politischen Rahmenbedingungen zu warten oder eine »Experimentierklausel« anzustoßen hat sich kurzfristig als nicht zielführend herausgestellt. Daher wird in Einzelfällen eine Prüfung der Privilegierung nach §35 BauGB angestrebt. Die folgenden Absätze können dafür als Argumentationshilfe dienen.

Die geplante Anlage dient einem landwirtschaftlichen bzw. gartenbaulichen Betrieb in funktioneller und räumlich direkt angegliederter Weise zum Schutz der Erwerbslandwirtschaft. Die für die Forschungsvorhaben ausgewählten Flächen befinden sich in direkter Nähe zu den Betrieben bzw. Forschungseinrichtungen und nehmen mit ihrer Fläche einen untergeordneten Teil der Betriebsflächen ein. Die Agri-PV-Anlage ist eine zweckmäßige Schutzkonstruktion, wie sie in ähnlicher Form bereits seit Jahrzehnten in Form von Hagelnetzen oder Folienüberdachung im Erwerbsgartenbau üblich ist. In den letzten Jahren zeichnet sich ein starker Trend hin zum geschützten Anbau ab, um Kulturen vor negativen Umwelteinflüssen zu schützen. Dabei werden typischerweise Kunststoffnetze oder Kunststofffolien verwendet, die durch Erdanker befestigt und über Pfahlkonstruktionen und Stahlseile abgespannt werden.

Hagelschutz: Die Errichtung von Erwerbsobstanlagen in den für den Obstbau klimatisch begünstigten Gebieten erfolgt in Abwägung von Hagelereignissen. Durch die Zunahme von Wetterextremen werden Neuanlagen im Regelfall mit einer Hagelschutzkonstruktion errichtet. Hagelschlag birgt neben den direkten negativen Auswirkungen durch Ertragseinbußen auch die Gefahr, dass sich an beschädigten Stellen der Pflanze Krankheitserreger einnisten. Ein Kunststoffnetz über der Kultur verhindert Beschädigungen der Pflanzen bzw. Früchte und leitet den Hagel in die Fahrgassenmitte ab. Die Implementierung von semitransparenten PV-Modulen mit einer Firsthöhe wie bei den vorhandenen Hagelnetzen, bieten voraussichtlich ähnliche Möglichkeiten des Kulturschutzes, soweit die Zwischenräume zwischen den PV-Modulreihen weiterhin mit Kunststoffnetze geschützt werden.

Sonnenschutz: In den letzten Jahren treten im Obst- und Weinbau vermehrt Problematiken auf, die auf zu hohe Sonneneinstrahlung zurückzuführen sind. Im Falle des Apfelbaus kann es ab einer Oberflächentemperatur des Apfels von mehr als 42 °C zu irreparabler Hitzedenaturierung kommen. Im Weinbau kommt es zu steigenden Zuckergehalten der Trauben, was einen erhöhten Alkoholgehalt des Weines zur Folge hat. Eine Beschattung der Kulturen kann diesen Auswirkungen entgegenwirken. Erfahrungen durch erhöhte Beschattung liegen bereits vor: Hagelschutznetze führen je nach Farbe zu einer Reduzierung der direkten Einstrahlung von minus zehn Prozent bis minus 30 Prozent. Ebenso wird bei Agri-PV-Anlagen die Solarstrahlung durch die PV-Zellen reduziert, aber im Gegensatz zur Netzüberdachung kann hier die Solarstrahlungsreduktion flexibler angepasst werden. Durch eine Erweiterung der Zellzwischenräume oder Nachführung der PV-Module kann die Agri-PV-Anlage an die Bedürfnisse der darunter wachsenden Pflanzen angepasst werden.

Verdunstungsschutz: Durch die Strahlungsreduktion kommt es zu einem zusätzlichen temporären Schutzeffekt. Besonders für Flächen, auf denen eine Bewässerungsmöglichkeit der Kulturen nicht gegeben ist, kann sich eine Agri-PV-Anlage durch die Reduktion der flächenbezogene Evapotranspiration positiv auswirken. Durch das verlangsamte Aufheizen der Anlage wird die Verdunstung reduziert und mehr Feuchtigkeit verbleibt im Boden, was besonders bei ausbleibenden Niederschlägen für die Kultur förderlich sein kann.

Frostschutz: Durch die PV-Module ist ein Schutzeffekt bei Strahlungsfrösten vorstellbar. Die in Spätfrostnächten abgegebene Wärme des Bodens wird durch die Überdachung in der Anlage bzw. dem Baumbestand gehalten, die Agri-PV-Anlage reduziert damit den konvektiven Wärmeverlust und kann so Schäden an den Blüten verhindern.

Regenschutz: Der Schutz der Kulturen vor Nässe reduziert das Risiko eines Pilzbefalls. Die Sporen der Pilze werden durch Regenereignisse freigesetzt, weshalb besonders im Frühjahr während der Regenereignisse Pflanzenschutzmaßnahmen durchgeführt werden. Bei ausbleibender Blattnässe haben Pilzsporen keine Möglichkeit, das Blatt oder die Frucht zu befallen, und eine Pflanzenschutzmaßnahme ist somit nicht bzw. reduziert notwendig. Darüber hinaus platzen Früchte von empfindlicheren Kulturen, wie Süßkirschen bei übermäßigem Regen auf.

Dauerhafter und langlebiger Schutz: Die Konstruktion der Anlage mit PV-Modulen übersteigt die Lebensdauer von üblichen Überdachungssystemen deutlich. Herkömmliche Hagelschutznetze und Folienüberdachungen werden im Durchschnitt alle acht bis zehn Jahre (Hagelschutznetze) bzw. 6 bis 8 Jahre (Folienüberdachung) ausgetauscht. Bei einer Agri-PV-Anlage kann man mindestens mit einer Lebensdauer von 20 Jahren rechnen.

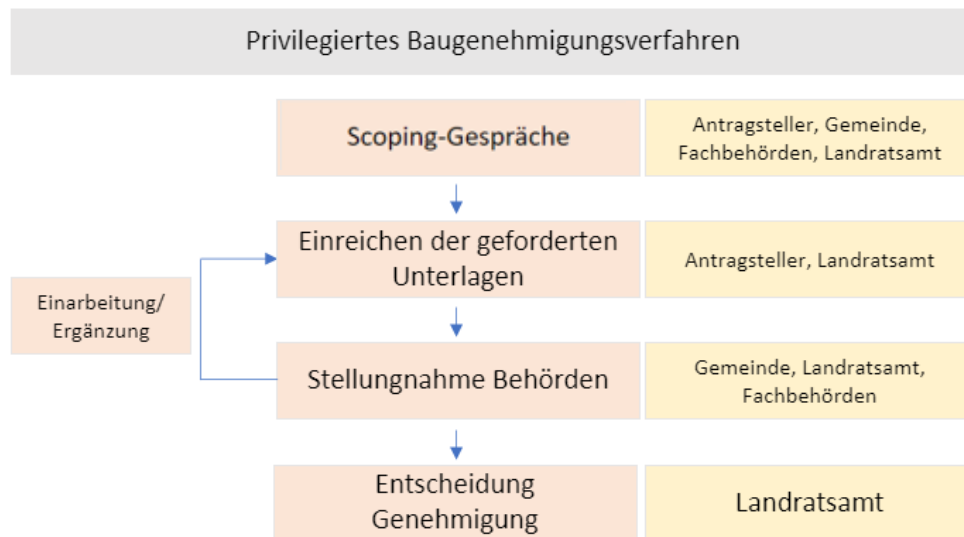


Fig. 3 Der Ablauf eines privilegierten Bauverfahrens

Wenn keine Privilegierung möglich ist, muss im Regelfall ein deutlich komplexeres Bauverfahren angestoßen werden. Der Ablauf ist im Folgenden dargestellt:

Tabelle 2 Allgemeine Information zum Bebauungsverfahren

	Beschreibung
Einleitung des Verfahrens	<p>Für die Einleitung eines Bebauungsplanverfahrens muss ein städtebauliches Erfordernis vorliegen. Es besteht kein Rechtsanspruch auf Aufstellung eines Bebauungsplanes.</p> <p>Der <u>Anstoß</u> für die Einleitung eines Bebauungsplanverfahrens kann grundsätzlich durch jeden erfolgen. Meistens erfolgt er jedoch durch</p> <ul style="list-style-type: none"> • die Bürger, • den Rat und / oder • die Verwaltung. <p>Beispielsweise können aber auch die Gemeindewerke oder Firmen den Anstoß dafür geben.</p> <p>Die Verwaltung ergründet und prüft Sach- und Rechtslage. Stellt in einer Vorlage den Sachverhalt dar und legt diese den politischen Gremien zur Entscheidung vor.</p>
Aufstellungsbeschluss (§ 2 Absatz 1 BauGB)	<p>Der Planungsausschuss berät die Vorlage und beschließt.</p> <p>Beschlussoptionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ablehnung, das Verfahren ist beendet. • Wesentliche Änderungsvorschläge, Auftrag an Verwaltung erneut mit Änderungen vorlegen. • Beschlussempfehlung an den Rat der Gemeinde, das Verfahren zur Änderung des Bebauungsplanes einzuleiten. <p>Der Rat berät die Beschlussempfehlung des Planungsausschusses und beschließt.</p> <p>Beschlussoptionen:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Ablehnung, das Verfahren ist beendet. • Wesentliche Änderungsvorschläge, Auftrag an Verwaltung erneut mit Änderungen vorlegen, erforderlich erneut dann auch den Planungsausschuss zu beteiligen. • Beschluss, das Verfahren zur Änderung des Bebauungsplanes einzuleiten <p>Der Aufstellungsbeschluss des Rates wird veröffentlicht (Amtsblatt und Internet).</p>
Vorentwurf	<p>Die Verwaltung erstellt einen Vorentwurf. In aller Regel wird hierzu ein Planungsbüro beauftragt. Hierbei werden die wesentlichen Inhalte des Bebauungsplanes gezeichnet und beschrieben.</p>

Frühzeitige Öffentlichkeits- und Behördenbeteiligung
 (§ 3 Abs. 1 BauGB und § 4 Abs. 1 BauGB)

Der **Planungsausschuss** berät den Vorentwurf und beschließt.

Beschlussoptionen:

- Wesentliche Änderungsvorschläge, Auftrag an Verwaltung erneut mit Änderungen vorlegen.
- Beschluss zur frühzeitigen Öffentlichkeits- und Behördenbeteiligung.

Öffentlichkeitsbeteiligung:

Der Vorentwurf des Bebauungsplanes (ggf. in verschiedenen Varianten) liegt-abhängig von Umfang und Bedeutung-in der Regel für die Dauer von einem Monat im Rathaus aus. Eine Frist ist nicht gesetzlich vorgegeben. Die Gemeinde weist durch Veröffentlichung auf die Offenlage hin und gibt ein verbindliches Datum für die späteste Einreichung von Anregungen bekannt.

Während dieser Zeit kann jeder (nicht nur Bürgerinnen und Bürger der Gemeinde) schriftlich oder zur Niederschrift Stellungnahmen zum Bebauungsplanentwurf abgeben.

Parallel zur Bürgerbeteiligung nehmen unterschiedliche **Behörden und sonstige Träger öffentlicher Belange** (z.B. der Rhein-Sieg-Kreis, Ver- und Entsorgungsunternehmen, Bezirksregierung Köln) zu den Planinhalten Stellung.

Die **Verwaltung** wertet die eingegangenen Anregungen und Stellungnahmen aus.

Es wird eine Vorlage für den Planungsausschuss erstellt. Alle eingegangenen Anregungen und Stellungnahmen werden in der Vorlage dargestellt und gewürdigt.

Auslegungsbeschluss
 (§ 3 Abs. 2 BauGB)

Der **Planungsausschuss** berät über alle eingegangenen Anregungen und Stellungnahmen. Beschlussoptionen:

- Bei der Annahme von wesentlichen Änderungsvorschlägen, Auftrag an Verwaltung erneut mit Änderungen vorlegen.
- Beschluss zur öffentlichen Auslegung des konkretisierten Bebauungsplanes

**Öffentliche Auslegung
und Beteiligung der Be-
hörden
(§ 3 Abs. 2 und § 4 Abs.
2 BauGB)**

Für die Dauer eines Monats folgt die **öffentliche Auslegung**, bei der der konkretisierte Bebauungsplanentwurf im Rathaus einsehbar ist.

Die öffentliche Auslegung muss amtlich bekannt gegeben werden (Amtsblatt).

Während dieser Zeit hat nun erneut jeder die Möglichkeit, Stellungnahmen zum Planentwurf einzubringen.

Parallel zur Öffentlichkeitsbeteiligung nehmen **Behörden und sonstige Träger öffentlicher Belange** erneut zu den Planinhalten Stellung.

Die **Verwaltung** wertet die eingegangenen Anregungen und Stellungnahmen aus. Es wird eine Vorlage für den Planungsausschuss erstellt. Alle eingegangenen Anregungen und Stellungnahmen werden in der Vorlage dargestellt und gewürdigt.

**Satzungsbeschluss
(§ 10 BauGB)**

Der **Planungsausschuss** berät über alle während der Öffentlichen Auslegung eingegangenen Anregungen und Stellungnahmen.

Beschlussoptionen:

- Aufgrund der eingegangenen Anregungen und Stellungnahmen kann der Ausschuss wesentliche Änderungen des Bebauungsplanes beschließen, welche die Grundzüge der Planung berühren. Dann muss eine erneute Offenlage nach § 3 Abs. 2 und § 4 Abs. 2 BauGB erfolgen (siehe oben). (Wiederum ist die Dauer eines Monats per Gesetz vorgeschrieben und die Beteiligung der Behörden und sonstiger Träger öffentlicher Belange findet parallel statt.)
- Ohne wesentliche Änderungen erfolgt die Beschlussempfehlung an den Rat.

Der **Rat** berät die Beschlussempfehlung des Planungsausschusses und beschließt.

Beschlussoptionen:

- Entgegen der Beschlussempfehlung des Planungsausschusses kann der Rat wesentliche Änderungen des Bebauungsplanes beschließen, welche die Grundzüge der Planung berühren. Auch dann muss eine erneute Offenlage nach § 3 Abs. 2 und § 4 Abs. 2 BauGB erfolgen (siehe oben). (Wiederum ist die Dauer eines Monats per Gesetz vorgeschrieben und die Beteiligung der Behörden und sonstiger Träger öffentlicher Belange findet parallel statt.)
- Satzungsbeschluss

Öffentliche Bekanntmachung Ist der Bebauungsplan aus dem Flächennutzungsplanentwickelt, erfolgt unmittelbar die **Bekanntmachung** im Amtsblatt.
 Der Bebauungsplan ist somit dann rechtskräftig in Kraftgetreten.

Optional: Musste neben dem Bebauungsplan der Flächennutzungsplan auch geändert werden, (gleicher Verfahrensablauf wie beim Bebauungsplan) wird zuerst der **Flächennutzungsplan der Bezirksregierung Köln** zur Genehmigung vorgelegt.

Diese hat für ihre Entscheidung drei Monate Zeit, mit der Option auf eine Verlängerung der Frist.

Nach Genehmigung der Flächennutzungsplanänderung wird diese sowie auch der Bebauungsplan im Amtsblatt bekannt gemacht.

Damit sind die FNP-Änderung und der Bebauungsplan rechtswirksam bzw. rechtskräftig.

Weitergehend wurden die zwölf Agri-PV-Standorte der Modellregion unter raumplanerischen Aspekten analysiert. Grundlage dieser Beurteilung war die erstellte Standortübersicht der Projekte:

- Alternative Verfahrenswege schließen Beteiligung der Standortkommunen nicht aus.
- Raumbedeutsamkeit von Vorhaben: Individuelle Bewertung der Standorte unter verschiedenen Gesichtspunkten:
 - Anlagengröße
 - Einfluss auf Schutzgüter wie z. B. Wasser
 - Landschaftsbild
 - Naturschutz
- Kleinere Anlagen haben bessere Chancen um als nicht raumbedeutsam eingestuft zu werden und haben damit besser Aussichten im Verfahren.
- Die genannten Gesichtspunkte müssen im Einzelfall mit den Regionalverbänden abgeklärt werden.

Generell sollte frühzeitig Kontakt mit den beteiligten Behörden (Gemeinde, Baurechtsbehörde) Kontakt aufgenommen werden. Die intensiven Diskussionen bezüglich landschaftsästhetischer Auswirkungen bei Hagelschutznetzen vor 20 bis 30 Jahren zeigen den Stellenwert der frühen Einbindung von Gemeinden, Behörden und der Bevölkerung. Seitens diverser Behörden wurde Interesse angemeldet, das Forschungsvorhaben in der Umsetzung zu begleiten.

2.7 Ökologie und Nachhaltigkeit

Um die Auswirkungen der Agri-PV auf Umwelt und Natur zu untersuchen, sind im AP7 des Rahmenprogramms Untersuchungen an den zwölf Standorten hinsichtlich ihrer Einflüsse auf Pflanzen- und Tierbestände vorgesehen. Neben botanischen und entomologischen Untersuchungen sollen dabei auch ornithologische Fragen bearbeitet werden. Parallel dazu werden Konzepte für biodiversitätssteigernde Maßnahmen erarbei-

tet, welche in einem Teil der Demonstrationsanlagen integriert werden. So ergeben sich beispielsweise durch die vorhandenen Unterkonstruktionen die Möglichkeit, Vogelnistplätze, Insektenhotels oder gezielt Rückzugsmöglichkeiten für Nützlinge in einem PV-Habitat umzusetzen. Zudem werden die im Projekt umgesetzten Agri-PV-Systeme in einer Ökobilanzierung (LCA) miteinander verglichen und Ansätze zur Reduktion des ökologischen Fußabdrucks der Agri-PV evaluiert.

Im Austausch mit den laufenden Projekten der Bodensee-Stiftung «Obstbau-Modellanlagen zur Förderung der Biologischen Vielfalt» sowie »PRO PLANET Apfelprojekt« sollen technische und ökologische Anforderungen der Agri-PV-Systeme abgewogen werden und wechselseitige Effekte und Anpassungserfordernisse bewertet werden. Empfehlungen zur Verbesserung der Lösungsansätze werden durch Abgleich mit den Ergebnissen aus dem Biodiversitäts-Monitoring der Universität Freiburg entwickelt. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde eine Aufgabenstruktur entwickelt, welche die ökologische Rahmenforschung in eine konzeptionelle Phase und eine Monitoring-Phase unterteilt. Die Bodensee-Stiftung übernimmt die Konzeptentwicklung und Umsetzung der biodiversitätsfördernden Maßnahmen für die einzelnen Standorte. Somit können Erkenntnisse synergetisch zwischen den Standorten übertragen bzw. verglichen werden. Die Universität Freiburg übernimmt die Durchführung eines Monitorings der Biodiversität von (Greif-) Vögeln und Insekten mit Schwerpunkt auf Bestäubern. Die Auswirkungen von Agri-PV auf die Fauna sind bisher nur unzureichend untersucht worden und daher essenzieller Bestandteil in der Erforschung der Umweltauswirkungen. Dabei sollen zum einen die Auswirkungen auf die Artenvielfalt durch die Installation von Agri-PV und zum anderen die Resonanz auf die Biodiversitäts-Maßnahmen untersucht werden. Um eine aussagekräftige, quantitative Analyse der Biodiversität durchzuführen, ist eine große Stichprobe notwendig. Im Zuge der Modellregion könnten jedoch maximal zwölf Agri-PV Anlagen und deren Referenzflächen untersucht werden. Daher sollte im Fokus des Monitorings verstärkt auf der Bewertung von Qualitätskriterien einzelner Arten und von Biozönosen liegen. Außerdem ergibt sich aus dem geplanten Monitoring die Notwendigkeit, relativ ähnliche biodiversitätssteigernde Maßnahmen an den einzelnen Standorten zu realisieren, um eine Vergleichbarkeit der Forschungsergebnisse zu gewährleisten.

Eine weitere Option, durch das Biodiversitäts-Monitoring besonders gefährdete Arten zu fördern und zu untersuchen, gestaltet sich schwierig, weil die (intensive) landwirtschaftliche Nutzung dieser Zielsetzung entgegenwirken würde. Eine alternative Möglichkeit die Biodiversität der Standorte zu bewerten wäre auch, ein »Choice-Experiment« bei dem die Qualität und Quantität der Artenvielfalt auf der Referenzfläche und der Agri-PV-Fläche verglichen wird.

Aus den verschiedenen Monitoring-Ansätzen ergeben sich demnach unterschiedliche Forschungsfragen: Zum einen soll die Biodiversität der Agri-PV-Standorte aber auch zwischen einzelnen Agri-PV Systemen und der Referenzfläche verglichen werden. Weitergehend soll die Funktionalität der implementierten biodiversitätssteigernden Maßnahmen in Kombination mit Agri-PV-Systemen untersucht werden. Hieraus lässt sich die Frage ableiten, ob Agri-PV-Systeme synergetische Vorteile bieten (z. B. Blühstreifen oder Nist-Möglichkeiten an der Unterkonstruktion) und negative Einflüsse aus der Landwirtschaft abgeschwächt werden, oder ob durch die Beschattung mit Modulen auch Nachteile entstehen.

2.8 Wirtschaftlichkeitsanalysen

Letztlich entscheidet über den Erfolg oder Misserfolg einer Technologie ihre Wirtschaftlichkeit. Daher ist in den einzelnen Teilprojekten geplant, kulturspezifische Wirtschaft-

lichkeitsrechnungen anzustellen. In AP8 des Rahmenprogramms soll deshalb die Integration der Analysen der Teilprojekte erfolgen, um die Wirtschaftlichkeit von Agri-PV im Sonderkulturbereich umfassend zu analysieren. Zur Sicherung der Vergleichbarkeit werden einheitliche Vorgaben an die ökonomischen Analysen gestellt und diese in Zusammenarbeit mit den Teilprojekten ausgewertet. Dabei wird auch eine Methodik entwickelt, um Agri-PV im Kontext der Ökonomie der Ökosysteme und Artenvielfalt darzustellen. Des Weiteren ist die Entwicklung verschiedener Geschäftsmodelle in den Bereichen Wein-, Obst- und Ackerbau Teil der Arbeitspakete im Rahmenprogramm. Durch die Erprobung der vielversprechendsten Technologien und Einsatzbereiche sowie durch die Einbeziehung zahlreicher KMUs und führender Großunternehmen der PV-Branche trägt die Modellregion dazu bei, Innovationsanreize zu setzen und die Wettbewerbsfähigkeit deutscher Technologien zu fördern.

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie hat sich gezeigt, dass an den Forschungsstandorten die Bindung der Flächen über einen langen Zeitraum tendenziell als kritisch erachtet wird, da die Flächen vorwiegend für Forschungszwecke und nicht einem wirtschaftlichen Betrieb der Agri-PV-Anlagen dienen. Da der Forschungsbedarf über einen Zeitraum von zehn Jahren oder mehr mit Unsicherheiten behaftet ist, erscheint die Finanzierung über lange Stromabnahmeverträge bzw. externe Investoren mit langjähriger Verpflichtung kaum erstrebenswert. Der Stiftungsbeirat des KOB hat bereits signalisiert, dass deren Fläche nicht über die Dauer von zehn Jahren hinaus gebunden werden sollten und eine Rückbaumöglichkeit eingeplant werden sollen.

Hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit der Agri-PV entfallen auf Seiten der Stromerzeugung im Vergleich zu herkömmlichen PV-FFA die Kosten für Wildwuchsbeseitigung und Einfriedungen. Demgegenüber stehen erhöhte Kosten für aufwendigere Unterkonstruktionen und Unterhaltung und ein tendenziell geringerer Stromertrag pro Fläche. Der wirtschaftliche Nachteil für Agri-PV-Anlagen gegenüber herkömmlichen PV-FFA kann anhand von ähnlichen Projekten im europäischen Ausland mit 20 bis 50 Prozent abgeschätzt werden. Er variiert abhängig von Bauweise und Bauhöhe der Aufständering. Zum Ausgleich des Nachteils tragen die Erlöse der landwirtschaftlichen Kulturen in unterschiedlichem Umfang bei. Nach aktuellem Stand entfallen dagegen die EU-Direktzahlungen, soweit diese nicht von den Landwirtschaftsbetrieben eingeklagt werden.

Die größten Herausforderungen für einen Markteintritt in Deutschland sind momentan Unsicherheiten bezüglich der rechtlichen Rahmenbedingungen zu Genehmigungsfragen und Beihilfefähigkeiten sowie die weitgehend fehlende Möglichkeit, Einspeisevergütungen für Strom aus Agri-PV zu erhalten.

2.9

Übertragung der Projektergebnisse auf Bundesebene

Um die Ergebnisse der Modellregion bereits während der Laufzeit des Projektes auf die Bundes- und damit teilweise auch auf die EU-Ebene zu übertragen, sollen im AP9 des Rahmenprogramms die rechtlichen Forschungsergebnisse und Optionen verschiedener Förderregime hinsichtlich laufender Gesetzgebungsverfahren und politischer Prozesse des Bundes und der EU eingeordnet. Dazu wird ein übergreifender Diskurs zwischen den Ministerien BMBF, BMWi, BMEL und BMU angestrebt. Dieser erscheint notwendig, um die sektorübergreifenden Aspekte der Agri-PV angemessen abzuwägen. Ebenfalls Teil des Rahmenprogramms ist die Vorbereitung einer Norm auf Grundlage der seit April 2021 geltenden DIN SPEC 91434 für Agri-PV sowie die Mitarbeit zur Harmonisierung europäischer und internationaler Normen.

Neben der Vorbereitung von Normierungsprozessen und der Schaffung von Entscheidungsgrundlagen für Gesetz- und Fördermittelgeber, dient die Durchführbarkeitsstudie zur Machbarkeitsanalyse seitens der Landwirtschaft, Technik, des Rechtes, der Ökonomie und Ökologie. Die Ergebnisse bilden somit das Fundament für ein strukturiertes Projekt und eine Agri-PV Modellregion in Baden-Württemberg. Die umfassenden wissenschaftlichen Erkenntnisse aus der Modellregion können auf Bundesebene übertragen werden und mit internationaler Forschung verglichen werden. Somit wird ein stabiles Fundament für die Implementierung der Agri-PV-Technologie geschaffen.

2.10

Öffentlichkeitsarbeit und Wissenstransfer

Das Zusammenwirken der einzelnen Teilprojekte soll auch öffentlichkeitswirksam dargestellt werden. Hierzu ist im AP10 des Rahmenprogramms geplant, einen gemeinsamen Onlineauftritt der gesamten Modellregion zu initiieren und Informationsmaterial gebündelt zu entwickeln sowie die Einrichtung eines Projektbüros umzusetzen, um die zahlreichen Anfragen von Landwirtschaftsbetrieben, Energieversorgern, Kommunen und Entscheidungsträgern zu koordinieren und individuell beantworten zu können. Möglichkeiten der Überführung des Projektbüros in einen Bundesverband Agri-Photovoltaik sollen während der Projektlaufzeit evaluiert werden. Dazu wurden bis dato ein Informationsfilm, Informationsbroschüren und die Gestaltung von Info-Tafeln geplant. Dies soll die Außenwirkung des Projektes erhöhen und die übergeordnete Idee der Modellregion aufzeigen.

Sowohl aus dem Rahmenprogramm als auch aus den einzelnen Teilprojekten werden Forschungsfragen im Rahmen von Abschlussarbeiten (Bachelor, Master, Promotion) bearbeitet. Die Umsetzung der Demonstrationsanlagen vor Ort ermöglicht den Wissenstransfer in die Praxis. Dies geschieht in Form von Vorführungen, Weiterbildungen und Kursen für landwirtschaftlich und obstbaulich relevante Personengruppen (Auszubildende, Studenten und Landwirte bzw. Obstbauern). Die eigenen Erfahrungen der Projektpartner im Umgang mit den Anlagen fördern die Qualität der Lehre und tragen voraussichtlich zu den wissenschaftlichen Erfolgsaussichten der Agri-PV bei.

3 Teilprojekt Kernobst

Im Kernobstbau verlagert sich die Produktion aufgrund des Klimawandels mehr und mehr in Richtung des geschützten Anbaus. Mit Folien und Netzen können wetterbedingte Risiken wie Hagelschlag, Sonnenbrand und nässebedingter Schaderregerbefall im Anbau minimiert werden. Hagel führt neben Spätfrost zu gravierenden Schäden im Erwerbsobstanbau. Bei schweren Hagelunwettern können neben der Ernte auch die Bäume, besonders bei Junganlagen, nachhaltig geschädigt werden. In den letzten Jahren ist den Hagelschutznetzen eine zusätzliche Aufgabe als Sonnenschutz zugekommen, da Sonnenbrandschäden an Äpfeln in Abhängigkeit von Sonneneinstrahlung und Temperatur stetig zunehmen. Bei Überdachung könnten neben Hagel- und Sonnenbrandschäden auch der Pflanzenschutzmitteleinsatz deutlich reduziert werden. Bei dieser Form des intensiven Kernobstanbaus müssen die Folien und Netze i. d. R. nach einigen Jahren ersetzt werden. Um den Materialeinsatz im geschützten Anbau zu verringern und die Fläche zusätzlich zur Stromerzeugung zu nutzen, bestünde die Möglichkeit, Solarmodule in die Schutzsysteme zu integrieren, welche die Schutzfunktionen übernehmen könnten.

Um Agri-PV im Kernobstbau voranzutreiben, müssen die Vorteile des Konzepts anhand von Praxisbeispielen nachgewiesen bzw. Anlagenauslegungen, die maximalen Nutzen bringen, entworfen und erprobt werden. Im Rahmen der Vorstudie für die Modellregion Agri-PV BaWü wurden umfangreiche Analysen und Berechnungen vorgenommen und Gespräche mit verantwortlichen Partnern geführt, um den Bau von drei Agri-PV-Anlagen im Obstbau vorzubereiten. Die Vorarbeiten bezüglich der Umsetzbarkeit beziehen sich auf die Standorte *Bavendorf* bei Ravensburg (Kapitel 3.4), *Augustenberg* bei Karlsruhe (Kapitel 3.5) und *Kressbronn* am Bodensee (Kapitel 3.6). Gemeinsam mit Technologiepartnern wurden teilweise bereits standortspezifische PV-Anlagen entsprechend der Bedürfnisse der Kulturen entworfen. Aspekte wie die Nutzung des abfließenden Regenwassers, der Umgang mit Schneelasten oder der Einfluss von Pflanzenschutzmitteln auf die PV-Konstruktion könnten im Rahmen dieses Projekts beleuchtet werden.

3.1 Ziele

3.1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Im Vordergrund des Projekts steht eine sichere und qualitativ hochwertige Apfel- und Birnenproduktion mit zusätzlicher Solarstromproduktion. Oberstes Ziel ist die Entwicklung und Umsetzung von drei Agri-PV-Prototypen für den Kernobstanbau und deren wissenschaftliche Begleitung, hauptsächlich um Erkenntnisse über das Verhalten von Kernobst in partieller Verschattung und entsprechend veränderter klimatischer Bedingungen zu gewinnen. Darüber hinaus soll der produzierte Strom direkt in der Apfelproduktion und -lagerung genutzt werden.

Für eine optimale Auslegung einer Agri-PV-Anlage liegen bereits detaillierte Ausführungen mehrerer Varianten vor, die auch auf ihre Wirtschaftlichkeit geprüft und analysiert wurden und in den Kapiteln 3.5.2.2 und 3.5.2.3 vorgestellt werden. Im Fokus der Studie liegt, ob nachgeführte Systeme (vgl. Kapitel 1.1), eine sinnvolle Alternative zu fixierten PV-Anlagen bieten. Der Nachführung der PV-Module würde damit zeitweise vom elektrischen Optimum abweichen und an die Lichtbedürfnisse der Pflanzen angepasst werden.

Inwieweit eine »theoretisch« optimal ausgelegte Anlage den erhofften Nutzen bringt muss über mehrere Jahre beobachtet und ausgewertet werden. Der agrarwissenschaftliche Schwerpunkt des Teilprojekts liegt in der Beantwortung von Forschungsfragen zu Wachstum, Ertrag, Fruchtqualität und Schädlingsdruck sowie der Identifizierung geeigneter Apfel- und Birnensorten. Durch die wissenschaftliche Begleitung an drei Standorten, die sich nicht nur im Versuchsaufbau, sondern auch klimatisch unterscheiden, wird nach der Durchführung des hier vorgeschlagenen Projektes ein breites Spektrum an Ergebnissen zur Verfügung stehen, das Rückschlüsse auf klimatisch ähnlichen Regionen zulässt. Aspekte wie die Nutzung des abfließenden Regenwassers oder potenzielle Schäden durch Abtropfkanten und Rinnsalbildung, der Umgang mit Schneelasten oder der Einfluss von Pflanzenschutzmitteln auf die PV-Komponenten sollen im Rahmen des Teilprojekts beleuchtet werden.

Ein hoher Anteil der gewonnenen Energie kann besonders in der Apfelproduktion effektiv in den vor- und nachgelagerten Bereichen vor Ort dezentral genutzt werden. Sei es durch den Einsatz von elektrifizierten Landmaschinen oder bei der Lagerung der Äpfel im Kühlhaus. Besonders die Lagerung ist sehr energieintensiv und stellt einen wichtigen Kostenfaktor in der Apfelproduktion dar. Agri-PV-Anlagen könnten diese Energiekosten zumindest teilweise decken und sind damit potenziell für Apfelproduzenten interessant. Durch die thermische Masse und Kapazität der Äpfel ist es theoretisch möglich, durch tägliche Temperaturschwankungen von weniger als 1 °C den Strombedarf in der Nacht zu senken und am Tag während der PV-Generationszeit zu erhöhen und damit den Eigenverbrauch zu steigern. Zudem erhöht eine lange Lagerung von regional erzeugten Äpfeln unter Nutzung fossiler Energieträger den Carbon Footprint der einheimischen Ware oft deutlich. Durch den Einsatz von Agri-PV könnte der Carbon Footprint verringert werden, womit das Verkaufsargument »Regionalität« beim Verbraucher weiter an Bedeutung gewinnen würde. Insbesondere für die ökologische Apfelerzeugung wäre eine wichtige Vermarktungsstrategie geschaffen und könnte zum Ende der Verkaufssaison die Beliebtheit regionaler Ware steigern. Gerade in der Bodenseeregion ist eine Vermarktung von Äpfeln mit Regionalbezug weit verbreitet (»Obst vom Bodensee«).

3.1.2 Beschreibung & Ziele aller Partner

3.1.2.1 Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee (KOB)

Die agrarwissenschaftliche Begleitforschung im Teilprojekt Kernobst wird vom KOB, einer 2001 gegründeten privatrechtlichen Stiftung, geleitet. Ihr Zweck ist die Förderung des Obstanbaus in der Bodenseeregion und damit auch der Erhalt der dort gewachsenen Kulturlandschaft. Dabei werden die Aufgaben an der Nahtstelle zwischen Wissenschaft und Praxis übernommen. Hierzu zählt einerseits die an den Standort gebundene grundlagenorientierte Forschung. Andererseits soll durch anwendungsorientierte Untersuchungen und Beratung, aber auch durch grenzüberschreitende Zusammenarbeit mit Einrichtungen anderer Obstbauregionen die Umsetzung der Forschungsergebnisse in die obstbauliche Praxis gefördert werden. Auf dem Ökomodell- und Versuchsbetrieb am KOB erzielte die Apfelproduktion in voll eingetzter Anlage und entsprechend partieller Verschattung gute Ernteergebnisse bei gleichzeitiger Reduktion von Pflanzenschutzmitteln. Je nach Farbe des Hagelschutznetzes werden nach unterschiedlichen Untersuchungen zwischen 10 Prozent (weiße Netze) bis ca. 30 Prozent (schwarze Netze) des einfallenden Lichts absorbiert. Das unter Hagelschutznetzen geringere Lichtangebot ist in der Sorten- und Mutantenwahl zu beachten und es gilt geeignete Sorten zu definieren.

3.1.2.2

Technischen Werke Schussental (TWS)

Die Technischen Werke Schussental GmbH & Co. KG (TWS) sind ein regionales Stadtwerk mit Sitz in Ravensburg. Der Standort KOB liegt im Stromnetzgebiet der TWS. Die TWS vertreibt ausschließlich Grünstrom und hat eines ihrer strategischen Ziele als ökologisch ausgerichtetes Unternehmen erreicht, die Strommenge, die sie an ihre Standardlastprofilkunden verkauft, auch selbst zu erzeugen. Die TWS möchte im Projekt Fragen der Netzverträglichkeit und der energiewirtschaftlichen Integration mit begleiten.

3.1.2.3

Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ Augustenberg)

Pflanzenbaus, der Pflanzengesundheit und der Produktqualität u.a. im Acker-, Gemüse- und Obstbau. Innerhalb dieser Aufgaben hat der Obsthof Augustenberg als Lehr- und Versuchsbetrieb im Obstbau eine wichtige regionale und überregionale Bedeutung in Forschung und Ausbildung. Ziele der Forschungsfragen sind die Erarbeitung von Strategien und praktische Lösungen für die obstbaulichen Betriebe. Das LTZ Augustenberg betreibt an verschiedenen Standorten in Baden-Württemberg u. a. angewandte Forschung zu allen Fragen des Pflanzenbaus und Pflanzengesundheit im Acker-, Obst- und Gemüsebau. Am Standort Augustenberg steht eine 15 Hektar große obstbauliche Versuchsanlage für die verschiedensten Versuchsfragen vorwiegend in obstbaulichen Dauerkulturen zur Verfügung. Durch die Aufgaben des LTZ Augustenberg besteht ein enger Kontakt zur obstbaulichen Beratung und Praxis, wodurch eine unmittelbare Vermittlung von Versuchsergebnissen und Erkenntnissen zur Pflanzengesundheit und zum Pflanzenbau gewährleistet ist. Für die geplante Agri-PV-Anlage ist somit der unmittelbare Bezug zur Praxis und damit zur breiten Umsetzbarkeit der Erkenntnisse gegeben. Das LTZ Augustenberg ist für den obstbaulichen Teil mit der pflanzenbaulichen und pflanzengesundheitlichen Bewertung einer Agri-PV-Anlage verantwortlich. Dem Sachgebiet Pflanzenschutz im Obstbau mit dem Obsthof und dem obstbaulichen Versuchsfeld am Standort Augustenberg in Karlsruhe liegen umfangreiche und langjährige Erfahrungen im praxisorientierten Versuchswesen sowie in der Bearbeitung von angewandten Forschungsfragen im Obstbau, im Pflanzenbau und in der Bewertung von Ertrag und Qualität des Erntegutes vor. Somit ist gewährleistet, dass die für das Projekt vorgesehenen Kulturen Apfel und Birne in Kombination mit Agri-PV im Hinblick auf die obstbaulichen Anforderungen praxisrelevant untersucht und bewertet werden.

3.1.2.4

Goldbeck Solar

Goldbeck Solar ist ein familiengeführtes EPC Solar-Unternehmen, das seit 20 Jahren in Deutschland und international Carports, Dach- und PV-Freiflächenanlagen entwickelt, baut und betreibt. Goldbeck Solar ist einer der Marktführer für PV-Anlagen in Deutschland, den Niederlanden und Polen. Das Unternehmen zeichnet sich durch seinen innovativen Geist aus und war z. B. Gewinner des InterSolar-Award 2017/2021 und dort mehrmals unter den Finalisten. Als EPC Solar-Unternehmen wurden von Goldbeck Solar Projekte in Höhe von über 1,5 GWp Leistung in 15 verschiedenen Ländern realisiert. Das Unternehmen hat Erfahrungen in der gesamten Projektkette von der Projektentwicklung über Planung, Beschaffung und Bau bis hin zu Betrieb und Wartung. Das Unternehmen hebt sich u. a. durch technisch spezialisierte Lösungen hervor, wie z. B. der erstmalig umgesetzten Kombination einer Deponieabdeckung mit einer Freiflächen-PV-Anlage. Andere innovative Ansätze berücksichtigen den Arten- und Naturschutz und anderer Belange.

Im Bereich Agri-PV ist Goldbeck Solar Mitautor der DIN SPEC 91434 sowie des Agri-PV-Leitfadens von SolarPower Europe. Das Unternehmen hat bereits intern Kapazitäten zum Thema Agri-PV aufgebaut und ist zudem im Austausch mit verschiedenen Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft. Know-How und Vernetzung ermöglichen es technisch-ökonomisch optimierte Agri-PV Anlagen zusammen mit Agrar-Expertinnen und Experten zu entwickeln. Ein bereits existierendes innovatives Design zur Integration von Solarenergie in die Landwirtschaft ist z. B. das von Goldbeck Solar entwickelte MarcS (Modular Arc System), eine modulare, bogenförmig ausgeführte Konstruktion für Solaranlagen, welche eine Nutzung der darunterliegenden Flächen ermöglicht. Goldbeck Solar hat dafür den InterSolar Award 2021 gewonnen. MarcS ist derzeit in der Phase der Markteinführung und erfährt positives Feedback.

Das Hauptziel von Goldbeck Solar in diesem Projekt ist die optimale Integration der Agri-PV unter Berücksichtigung des ausgewählten Standorts sowie die Prüfung der Möglichkeit eines technisch und wirtschaftlich tragbaren Konzepts im Obstbau, welches breiter im nationalen und internationalen Markt angeboten werden kann. Daneben ist es für das Unternehmen wichtig, verschiedene anlagenspezifische Parameter der PV-Anlage zu monitoren, einen angepassten Betrieb und Wartung umzusetzen, Best Practices herauszuarbeiten sowie Indikatoren aufzustellen, um zur technisch-ökonomischen Validierung des Konzepts beitragen zu können.

Das gemeinsame Ziel der Projektpartner LTZ Augustenberg und Goldbeck Solar ist es, Daten zu erarbeiten, obstbauliche Flächen effektiver durch die Kombination von Obstbau mit Agri-PV-Anlagen mit der Produktion von Solarstrom zu nutzen. Wichtig dabei sind die Klärung von Fragen zur technischen Umsetzung, zu pflanzenbaulichen und pflanzenschützerischen Auswirkungen zusammen mit der Bewertung der Wirtschaftlichkeit sowie Akzeptanz in der Öffentlichkeit. Diese Ergebnisse sollen als Grundlage dienen, Agri-PV in Sonderkulturen in der obstbaulichen Praxis zu etablieren (z. B. Energieversorgung für Bewässerungstechnik, Ladeinfrastruktur für batteriebetriebene Zugmaschinen auf dem Feld) und somit den Anforderungen zur Produktion und Nutzung von erneuerbarer Energie Rechnung zu tragen.

3.1.2.5

Obsthof Hubert Bernhard

Angesiedelt in Kressbronn bewirtschaftet Hubert Bernhard 86 Hektar landwirtschaftliche Nutzfläche. Davon sind 47 Hektar im Bereich Kernobst. Mit verschiedenen Sorten, wie zum Beispiel Jonagold, steht der Apfel als Hauptkultur im Vordergrund. Die Anbauflächen erstrecken sich vom Bodensee bis ins Hinterland und sind neben Äpfeln mit Erdbeeren, Stachelbeeren, Johannisbeeren und Hopfen bestellt. Seit dem Jahr 2014 ist der Betrieb im Modellvorhaben »Demonstrationsbetriebe integrierter Pflanzenschutz« aktiv. Herr Bernhard ist unter anderem Vorsitzender des Obstbauverbandes Tettngang sowie des dort ansässigen Maschinenringes.

3.1.2.6

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)

Mit über 1.200 Mitarbeitern ist das Fraunhofer ISE als Einrichtung der Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung (e.V.) das größte Forschungsinstitut für Solarenergie in Europa. Als Urheber der Agri-PV-Idee verfügt das Fraunhofer ISE über mehr als zwölf Jahre Erfahrung in dualen Landnutzungsanwendungen für Landwirtschaft und PV-Stromerzeugung und hat mehrere Lichtmanagement- und Strahlungssimulationen zur Verschattungsoptimierung, Machbarkeitsstudien und F&E-Dienstleistungen zu diesem Thema durchgeführt. Aktuell arbeitet das Fraunhofer ISE an 20 Agri-PV-Projekten in neun verschiedenen Ländern. Das Fraunhofer ISE begleitet das Teilprojekt und unterstützt die beteiligten agrarwissenschaftlichen Forschungsinstitute.

3.1.3 Projektkoordination

Die Institute LTZ Augustenberg und KOB haben jeweils eigene Forschungskonzepte für ihre Standorte entwickelt. In Kressbronn soll eine Praxisanlage entstehen, die nur in geringem Umfang beprobt werden soll.

Tabelle 3 Projektübersicht über die Standorte Bavendorf, Augustenberg und Kressbronn.

	Bavendorf	Augustenberg	Kressbronn
Projektleitung	KOB	LTZ Augustenberg	KOB
Bewirtschaftung	biologisch	biologisch	konventionell
Betrieb	Forschungsbetrieb	Forschungsbetrieb	Praxisbetrieb
Anlagendesign	Referenzangebot für Ausschreibung wird eingeholt: <ul style="list-style-type: none"> • Statisch (O-W-Dach) oder • Nachgeführt 	<ul style="list-style-type: none"> • Statisch (O-W-Dach) oder • Nachgeführt 	Statisch, zweireihige Ost-West Ausrichtung
Sorten	Apfel: Topaz, Natyra, Freya und Rustica und/oder Delcored	Apfel: Natyra, Bonita, Freya, Swing, Topaz und Rubelit Birne: Conference und Novembra	Gala
Anlagengröße [kWp]	Ca. 200	319	210-280

3.2 Stand der Wissenschaft und Technik

3.2.1 Agri-PV Anlagen im Kernobstanbau

Bisher gibt es zwei vergleichbare Forschungsanlagen, welche PV mit Kernobst kombinieren. Eine dieser Agri-PV-Anlagen ist von Sun'Agri im Süden Frankreichs errichtet worden (Sun'Agri, 2020). Bisherige Ergebnisse zeigen, dass die Verdunstung und damit der Trockenstress der Apfelbäume unter partieller Verschattung deutlich reduziert werden kann. Dieser Effekte konnte im Allgemeinen auch von Marrou, Dufour und Wery (2013) und Valle et al. (2017) nachgewiesen werden. Einhergehend konnte die Temperatur in der Agri-PV-Anlage um 2 - 4 °C gesenkt werden, was über die Blatttemperatur in Verbindung mit der Verdunstungsneigung der Pflanzen steht. Eine weitere Anlage ist durch ein Projekt des Fraunhofer ISE in Gelsdorf, Rheinland-Pfalz entstanden (Urbanitz, 2021). Die Agri-PV-Anlage wurde für Lichtverhältnissen wie unter Hagelnetzen von etwa 70 - 75 Prozent der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) ausgelegt. In einer Studie zu Agri-PV im Birnenanbau im Spindelsystem wird von Ertragsverlusten von etwa

55 Prozent bei 30 Prozent Verschattung ausgegangen, wobei hier nur der Massenertrag und nicht die Qualität berücksichtigt wurde und die Rahmenbedingungen nicht übertragbar sind (Willockx et al., 2020).

3.2.2 Vergleichbare Versuche

Bereits 2013 wurde auf dem Öko- und Modellversuchsbetrieb des KOB die Wirkung einer partiellen Verschattung auf den Apfelanbau untersucht. Im Versuch wurde die Apfelsorte Topaz unter dem sogenannten VÖEN-System kultiviert (Fig. 4, links). Bei dieser Art der Überdachung sind auf ein Hagelnetz mehrere Folienbahnen aufgenäht, sodass Windstöße durch die hochklappenden Folienbahnen passieren können. Als Referenzfläche diente eine Anlage, die nur mit einem Hagelnetz ausgerüstet war.



Fig. 4 Links: VÖEN- System über der Apfelsorte Topaz; Rechts: Ausfärbung der Früchte 2017. (Quelle: KOB)

Wie in Fig. 4 angedeutet, führte die Folienüberdachung zu einer durchschnittlichen Reduktion der photosynthetisch aktiven Strahlung von bis zu 30 Prozent gegenüber der Kontrolle. Sechsjährige Untersuchungen zeigen, dass dieser Lichtverlust weder Ertragsquantität noch -qualität negativ beeinträchtigen. Gemittelt über vier Ertragsjahre liegt die Ernte bei der Kontrolle bei 20,5 Kilogramm und unter der Folie bei 27,2 Kilogramm pro Baum. Der höhere Ertrag lässt sich vor allem auf widrige Witterungsverhältnisse während der Blüte zurückführen. Unter der Überdachung war es trocken und damit der Insektenflug während der Bestäubung intensiver. Bei der Ausfärbung der Früchte war über die Jahre hinweg bislang kein Unterschied festzustellen (Fig. 4, rechts), doch die Sonnenbrandschäden an den Früchten konnten im Jahr 2016 mit der Überdachung um 11,7 Prozent reduziert werden.

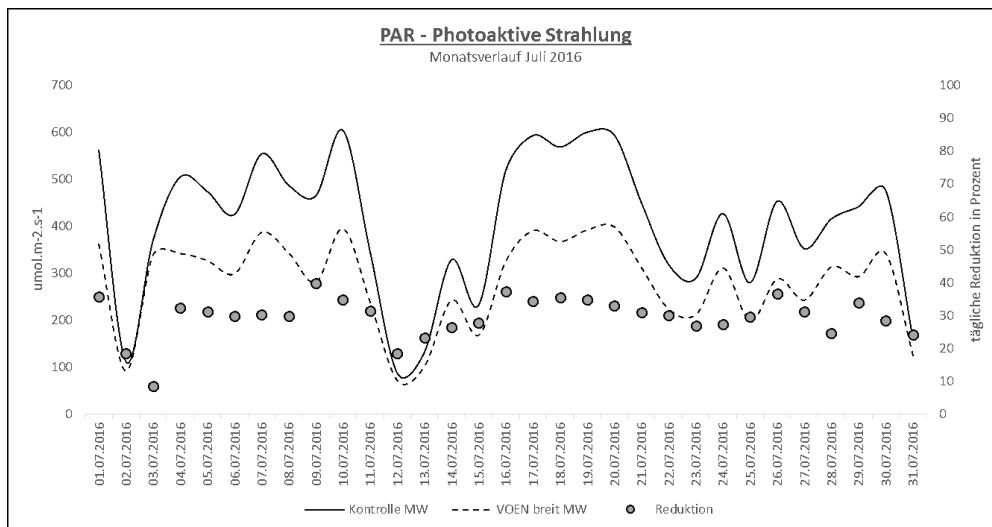


Fig. 5 Photosynthetisch aktive Strahlung unter Hagelschutznetz (Kontrolle – durchgezogene Linie) und Folie (VOEN - gestrichelte Linie).

Unter der Folie wurden im Vergleich zur Kontrolle keinerlei Fungizide ausgebracht. Der Befall durch die im Ökoobstanbau wirtschaftlich wichtigen Pilzkrankheiten Apfelschorf und Regenflecken war zu vernachlässigen. Besonders beeindruckend war, dass der Befall durch Lagerfäulen, insbesondere durch *Gloeosporium*, nahezu bei null Prozent lag, dagegen bei der Kontrolle trotz Einsatz von Fungiziden im Durchschnitt bei 30 Prozent. Die Vorteile der Folienüberdachung vom KOB zusammengefasst:

- Schutz durch Wetterextreme → vor allem während der Blüte konnte eine bessere Bestäubung höhere Erträge bewirken
- Reduzierte Sonnenbrandschäden
- Nahezu keine Ausfälle durch Pilzkrankheiten
- Einsparung von 80 Prozent der Pflanzenschutzmittelkosten

Kontroverse Ergebnisse zu Versuchen zum Apfelanbau unter Hagelnetz-Verschattung liefert eine Studie von Klophaus und Baab (2015), die auch die Qualität wie Deckfarbe, Zuckergehalt, Stärkegehalt und Fruchtfleischkonsistenz berücksichtigt. Bei der Apfelsorte Gala konnten höhere Qualitätserträge nachgewiesen werden. Bei Elstar ist konstanter Ertrag zu erwarten, während Evelina bei über 23 Prozent Verschattung mit Verlusten reagiert. Im Bericht des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie – Sachsen (Handsack, 2013) wird unter dem gängigen schwarzen Hagelschutznetz etwa 25 Prozent weniger PAR gemessen. Die Temperatur (wenn $> 5\text{ °C}$) unter dem Netz war 0,3 - 1,2 Kelvin geringer und die Luftfeuchtigkeit um etwa drei Prozent erhöht. Verglichen mit der Referenzfläche traten Frostereignisse unter Netz verzögert (zwei Stunden) und abgemildert (1,2 Kelvin) auf. Der Neigungswinkel der Netze hatte keinen Einfluss auf die Lichtdurchdringung. Der vegetative Wuchs der Apfelanlage war verstärkt und der Ertrag um zehn Prozent verringert. Auf die Fruchtgröße gab es keinen negativen Einfluss. Die Reife war unter dem schwarzen Hagelschutznetz verzögert. Ein leicht stärkerer Mehltaubefall wurde festgestellt.

Diese Voruntersuchungen zeigen generell, dass sehr unterschiedliche Ergebnisse bei verschiedenen Sorten möglich sind. Bisher liegen wenige empirischen Daten und Berichte über das Einsparpotenzial von Pflanzenschutzmittel bei gleichzeitiger Minderung der Krankheitsverluste vor.

3.3 Potentialanalyse

Neben klimatischen Gegebenheiten ist auch die zunehmende Forderung des Lebensmitteleinzelhandels nach gesicherter, aber auch saisonaler Erweiterung an Früchten hoher Qualität für die stetige Zunahme des geschützten Freilandanbaus bei Stein- und Beerenobst verantwortlich. Insbesondere bei Apfel- und Birnenkulturen wird, vor allem im Bioanbau, verstärkt der geschützte Anbau durchgeführt. Äpfel sind allgemein in Deutschland die Obstkultur mit der insgesamt größten Gesamtanbaufläche (44 Prozent entspricht ca. 34.000 Hektar). Der regionale Anbauswerpunkt liegt in Baden-Württemberg; allein im LK Bodensee befinden sich rund 16 Prozent des gesamten deutschen Apfelanbaus (Garming et al., 2018). Bei Apfel- und Birnenkulturen am Bodensee ist bereits aufgrund der zahlreichen durch den Klimawandel bedingten Hagelereignissen ein wirtschaftlicher Anbau nur noch mit Hagelschutznetzen möglich. Am Bodensee werden auf rund 7.500 Hektar Kernobst angebaut, von dem rund zwei Drittel (sprich 5.000 Hektar) bereits mit Hagelschutznetzen versehen sind.

Die nötige Folienüberdachung von Apfel- und Birnenkulturen ist mit hohen Investitionskosten verbunden, die sich bisher durch einen stabilen Ertrag durch den Schutz vor Wetterextremen und der Einsparung von Pflanzenschutzmitteln finanzieren lassen. Wie sich in dieser sowie anderen vorausgegangenen Vorstudien herausgestellt hat, sind die herkömmlichen Anbausysteme mit entsprechenden Höhen und Reihenabständen bestens geeignet, um Agri-PV-Systeme zu implementieren und bisherige Schutzsysteme zu ersetzen. Das Verhältnis von Reihenabstand und Modulbreite liegt im Bereich von herkömmlichen PV-Freiflächenanlagen. Flächenverluste durch die Unterkonstruktion des Agri-PV-Systems sind nicht zu erwarten. Dementsprechend entstehen mit Agri-PV nur geringfügige Mehrkosten und ein hohes wirtschaftliches Potenzial der Agri-PV im Obstbau wird erwartet.

Der Trend zum geschützten Anbau hat auch zur Folge, dass ein durch Sonderkulturen geprägtes Landschaftsbild bereits heute in vielen Regionen optisch stark beeinträchtigt wird. In diesen Fällen ist eine erhöhte gesellschaftliche Akzeptanz gegenüber der Agri-PV zu erwarten, da nicht nur Plastikfolien und Netze mit kurzen Lebensdauern (fünf bis zehn Jahre) ersetzt werden, sondern auch erneuerbarer Strom entsteht.

Das technoökonomische und gesellschaftliche Potenzial für die Doppelnutzung von Obstbauflächen für die gleichzeitige Stromproduktion erscheint daher grundsätzlich hoch. In der Bodenseeregion, welche aufgrund ihrer Agrarstruktur und anderer naturräumlicher Gegebenheiten wenig Flächenpotenzial für erneuerbare Energien aufweist, ermöglicht Agri-PV im Obstbau somit eine vielversprechende Möglichkeit erneuerbare Energien auszubauen.

3.4 Standort Bavendorf

3.4.1 Forschungskonzept und Innovationsgrund

Insgesamt sind am Standort Bavendorf zwei unterschiedliche Agri-PV-Systeme und eine Kontrollfläche vorgesehen. Der Versuchsaufbau kann der Skizze in Fig. 6 entnommen werden. Um unerwünschte Randeffekte ausschließen zu können, müssen die Versuchspartellen genügend Abstand voneinander haben. Die Gesamtfläche der Versuchsanlage beträgt 0,52 Hektar (83 Meter x 64 Meter). 18 Baumreihen werden mit einem Reihenabstand von 3,5 Meter und einem Baumabstand von einem Meter in Nord-Süd-Richtung gepflanzt und die PV-Module entsprechend nach West-Ost orientiert.



Fig. 6 Lageplan und erste Skizze des Versuchsaufbaus am Standort Bavendorf.

Bei der Agri-PV-Variante 1 wird es sich um ein nahezu geschlossenes System (Fig. 7, links) handeln. Die Entwässerung erfolgt mittels eines Rinnensystems über eine Zisterne, die als Speicher einer automatisierten Tröpfchenbewässerung dient. Bei der Agri-PV-Variante 2 erfolgt die Optimierung des landwirtschaftlichen und elektrischen Ertrags über nachgeführte PV-Module (Fig. 7, rechts). Voraussetzung der beiden Varianten ist, dass durch die Anordnung der Solarmode der Lichtverlust maximal 30 Prozent beträgt. Variante 3 ist die Referenz (Kontrolle), die mit schwarzen Hagelschutznetzen ausgerüstet wird.



Fig. 7 beispielhafte Darstellung eines geschlossenen (links) und eines nachgeführten (rechts) Systems. (Quelle: VIRIDI)

Der Versuch sieht vor, vier Apfelsorten zu untersuchen. Zwei davon sind die auf dem ökologischen Markt gängigen Sorten Topaz und Natyra, und zwei hätten das Potenzial, sich auf diesem zu etablieren (Freya und Rustica und/oder Delcored). Innerhalb der Varianten erfolgt die Anordnung der Bäume als randomisierte Blockanlage mit vier Wiederholungen. Die Anlage wird, wie der Ökomodell- und Versuchsbetrieb am KOB, nach BIOLAND-Richtlinien bewirtschaftet.

3.4.2 Machbarkeit

3.4.2.1 Umsetzungsvorschlag

Eine Projektumsetzung, die alle erwünschten Aspekte beinhaltet, wäre im Zeitrahmen von drei Jahren möglich; die genauen Arbeitspakete pro Quartal können Tabelle A 1 im Anhang A entnommen werden.

Arbeitspaket 1: Technische Implementierung

Die Fragestellungen beziehen sich auf die Kombinierbarkeit von Apfelanbausystemen und PV-Anlagentechnik. Hierfür steht das KOB in Kontakt mit dem Fraunhofer ISE.

- Wie muss eine Agri-PV-Anlage für eine Doppelnutzung im Apfelanbau aussehen? Welche technischen Erfordernisse (Unterkonstruktion, Anlagenbetrieb, Materialverschleiß) gibt es?
- Muss das Apfel-Anbausystem entsprechend angepasst werden (Höhe der Anlage, Reihenweiten, Baumhöhe, Sortenwahl, Erziehung der Bäume)?
- Wieviel PV-Leistung kann pro Fläche installiert werden, sodass eine photosynthetisch aktive Einstrahlung über die Vegetationsperiode für die Apfelbäume gewährleistet ist?
- Wie kann das Wassermanagement im Anlagendesign berücksichtigt werden?
- Verursacht der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln wie Schwefel und Kupfer (v. a. im ökologischen Landbau) Probleme mit der Agri-PV-Anlage (Panels, Unterkonstruktion)?

Arbeitspaket 2: Auswirkungen der Agri-PV-Anlage auf die Apfelproduktion

Um einen Einblick über geeignete Sorten zu erhalten, müssten folgenden APs durchgeführt werden. Die Fragestellungen beziehen sich auf pflanzenbauliche Parameter.

- Welchen Einfluss hat eine Agri-PV-Anlage auf Ertrag und Qualität des Ernteguts?
- Gibt es sortenspezifische Unterschiede?
- Wie beeinflusst Agri-PV Krankheiten und Schädlinge im Apfelanbau? Einsparungen von Pflanzenschutzmittel?
- Welchen Grad von Schutzfunktion bietet die Agri-PV-Obstanlage bei Hagel, Starkregen, Frost und Sonnenbrand?
- Welche Auswirkungen hat Agri-PV auf das Agrarökosystem (Wasserhaushalt, Temperatur, Biodiversität, Stofftransport)?

Arbeitspaket 3: Ökonomie und Energetische Bewertung

Die Fragestellungen beziehen sich auf die Erhebung von Daten für die Kosten- und Wirtschaftlichkeitsberechnung im Apfelanbau.

- Anschaffungskosten von herkömmlichen Apfelanbausystemen mit Hagel-schutznetzen bzw. Folienüberdachung
- Anschaffungskosten der Agri-PV Obstbau-Technik
- Betriebskosten der Apfelproduktion
- Betriebskosten Agri-PV Obstbau-Technik

- Einfluss der gesetzlichen Rahmenbedingungen auf die Stromgestehungskosten und Wirtschaftlichkeit von Agri-PV im Obstbau

Darüber hinaus sollen Möglichkeiten aufgezeigt werden, den erzeugten Strom besonders effektiv in den vor- und nachgelagerten Bereichen vor Ort dezentral zu nutzen, beispielsweise bei der Lagerung der Äpfel im Kühlhaus oder durch den Einsatz von elektrifizierten Landmaschinen. Hier spielt die Beurteilung der genauen Betriebskosten, speziell beim Laden mit Strom aus Eigenproduktion, im Vergleich zu dieselbetriebenen Maschinen eine Rolle. Ist eine CO₂-neutrale Apfelproduktion möglich?

3.4.2.2

Technische Machbarkeit

Da das KOB den Status einer Versuchsstation hat und die Anlage auf einer Versuchsfläche errichtet wird, ist der Erhalt einer Baugenehmigung sehr wahrscheinlich, auch raumordnerische Bedenken wurden ausgeschlossen. Für die Stromabnahme sind die lokal ansässigen Technischen Werke Schussental (TWS) vorgesehen. Da der Zuständigkeitsbereich von der TWS an der Mittelspannungsstation endet und der von Vermögen und Bau Baden-Württemberg (VB-BW) beginnt, wird VB-BW für den Netzanschluss eingebunden.

Es fanden mehrere Termine und Telefonate von Fraunhofer ISE und der TWS statt. Es besteht großes Interesse an der Agri-PV und der Einbindung in das Projekt. Gespräche ergaben die Preisindikation von > 6 ct. Die detaillierten Vertragsverhandlungen werden jedoch erst erfolgen können, wenn die Ausschreibung der Anlage abgeschlossen ist und damit die genaue Leistung und Ausrichtung feststeht. Um den zunehmenden Netzschwankungen durch Erneuerbare Energien und steigenden Abregelungszahlungen Rechnung zu tragen, wurden ebenfalls das Szenario diskutiert die Anlage bei Negativstrompreisen abzuriegeln und dafür einen höheren Grundbetrag zu erhalten. Dadurch wird das wirtschaftliche Risiko für den Stromabnehmer verringert. Der Anschluss beider Agri-PV-Varianten läuft über das Lagergebäude, der Trafo befindet sich in 50 Meter hinter dem Lagergebäude liegenden Außenbetriebsgebäude. Die Fläche ist vorbereitet, sodass der Baubeginn des Agri-PV Prototypen voraussichtlich im Herbst 2021 möglich sein wird. Da die Fläche leicht abschüssig ist wird eine Bodenvermessung und Planierung vor Baubeginn (Pfostenrammung) nötig. Die Fertigstellung ist für das Frühjahr 2022 geplant. Je nach Fortschritt des Baus findet im Anschluss eine Herbst- oder Frühjahrspflanzung der Bäume statt. Der Standort wird nach dem Vorbild europäischer Ausschreibung auf der Webseite des KOB ausgeschrieben werden.

3.4.2.3

Wirtschaftliche Machbarkeit

Die Kosten für Forschungsanlage werden mit 350.000 € von dem Zweckverband Oberschwäbische Elektrizitätswerke (OEW) bezuschusst. Die geschätzten Kosten für den Prototyp von 450.000 € zeigen, dass der Bau einer Anlage die Bezuschussung voraussichtlich übersteigen wird. Aktuell werden Finanzierungsmöglichkeiten für den fehlenden Betrag evaluiert. Das KOB selbst sieht keine Möglichkeit die Differenz zu überbrücken. Gespräche mit der TWS haben jedoch ergeben, dass diese möglicherweise die fehlende Differenz bezuschussen, dafür würde das KOB den Strom kostenlos abgeben bis den Betrag zurückgezahlt wäre. Für die Umsetzung des Standorts und die geplanten Forschungsaktivitäten wird ein Förderbedarf von ca. 284.000 € erwartet, was einer Förderquote von ca. 39 Prozent entspricht (Tabelle 4).

Tabelle 4 Kostenkalkulationen des Projekts am Standort Bavendorf.

	2021	2022	2023	2024	Summe
PM	4	12	12	8	36
Personalkosten/Monat [€]	6.500	6.500	6.500	6.500	
Personalkosten gesamt [€]	26.000	78.000	78.000	52.000	234.000
Materialkosten + Sachleistungen [€]	1.667	5.000	5.000	3.333	15.000
Unteraufträge [€]	30.000				30.000
Reisekosten [€]	556	1.667	1.667	1.111	5.000
Förderquote [%]	100	100	100	100	100
Zwischensumme [€]	58.222	84.667	84.667	56.444	284.000
Kosten APV-Prototyp [€]	450.000				450.000
Förderbedarf APV-Prototyp [€]	0				0
Gesamtförderquote [%]	12	100	100	100	39
Förderung [€]	58.222	84.667	84.667	56.444	284.000

3.4.2.4 Risikobewertung

Das Projekt am Standort Bavendorf ist mit keinen nennenswerten Risiken behaftet und raumplanerisch unbedenklich.

3.5 Standort Augustenberg

3.5.1 Forschungskonzept und Innovationsgrad

Der Standort Augustenberg des LTZ im nördlichen Oberrheingraben unterscheidet sich klimatisch deutlich vom Bodenseeraum in Oberschwaben. Er ist gekennzeichnet durch ein Klima mit vergleichsweise geringen Niederschlägen sowie höheren Temperaturen. Der Oberrheingraben gilt als Eintrittspforte für invasive Schaderreger und Verbreitungsgebiet für wärmeliebende Arten. In der Phänologie der Kulturpflanzen und Schaderreger kann man in den meisten Jahren von einem Unterschied von 10 - 14 Tagen zwischen Oberrheingraben und Oberschwaben ausgehen.

Am LTZ Augustenberg sollen sechs verschiedene schorfröbuste und -tolerante Apfelsorten (SQ-159 (= Natyra), Bonita, Wur037 (= Freya), Xeleven (=Swing), Topaz, Rubelit) sowie zwei Birnensorten (Conference und Novembra) mit und ohne Agri-PV unter ökologischer Bewirtschaftung angebaut werden. Das Sortenspektrum sowie die Einbezie-

hung von Birnen unterscheidet sich zu den anderen Kernobststandorten. Dabei sollen zwei Module mit unterschiedlicher Lichtdurchlässigkeit sowie der Anbau ohne Agri-PV verglichen werden. Es ist vorgesehen, die Anlage komplett gegen zufliegende Schadinsekten (z. B. Apfelwickler, invasive Stinkwanzen) einzunetzen. Die PV-Module sollen mit Hagelschutz kombiniert werden.

Das LTZ Augustenberg stellt für die Agri-PV Forschung etwa einen Hektar Fläche zur Verfügung, wobei 0,5 Hektar (5.021,5 m²) davon für die Installation der Agri-PV Anlage genutzt werden können, siehe Fig. 8. Die Baumreihenausrichtung des vorgesehenen Spindelanbausystems entspricht eine Südwestausrichtung mit 16° Abweichung von Süden und ist damit optimal für eine Ost-West-gerichtete Agri-PV-Anlage geeignet.

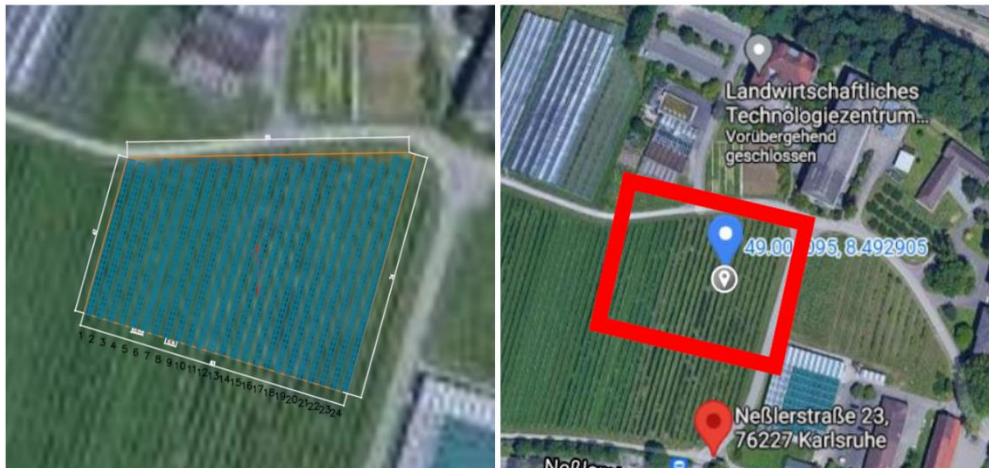


Fig. 8 Agri-PV Standort LTZ Augustenberg; 49°00'14.47" N, 8°29'34.16" O; Höhe ü.M.: 156 m.

Die pflanzenbaulichen Untersuchungen mit und ohne Agri-PV zielen auf die Baumgesundheit, das Wachstum sowie Fruchtansatz, Ertrag und Fruchtqualität, wie Ausfärbung, Größe oder Inhaltsstoffe ab. Interessant ist die Wirkung der Verschattung auf die natürliche Fruchtausdünnung, welche über das Lichtangebot gesteuert werden kann (Brevis, 2021). Durch die Verschattung kann die Triebkraft der Bäume angeregt werden, was für bestimmte Sorten dienlich ist – auch hierbei ist der Einfluss der Agri-PV-Anlage zu bewerten (Klophaus & Baab, 2015). Wichtige Kriterien der Bewertung des Einflusses einer Agri-PV-Anlage in Kombination mit einer Komplettinnetzung sind auch Aufkommen, Befallsstärke und -intensität von Schaderregern (z. B. Apfelwickler, Apfelsägewespe, Blutlaus, Wanzen, Spinnmilben, Blattläuse, Schorf, Mehltau) sowie Nützlingen. Es kann davon ausgegangen werden, dass unter der regendichteten Agri-PV-Anlage Einsparungen von Pflanzenschutzmittel möglich sind, was die Forschung zeigen muss. Hier sind entsprechende regelmäßige Bonituren im Verlauf der Vegetationszeit als Grundlage für Behandlungsentscheidungen sowie für die Einschätzung der Agri-PV-Anlage vorgesehen.

Die Systeminnovationen des geplanten Projektes sind der Schutz der Bäume vor Nässe sowie Hagel und damit eine Krankheitsvorbeugung durch Agri-PV-Module. Weiterhin besteht ein Schutz vor Sonnenbrand an den Früchten, der in den letzten Jahren regelmäßig zu hohen Ertragsausfällen führte. Die zwischen den Modulen vorgesehenen Hagelschutznetze stellen einen zusätzlichen Schutz bei Hagel und Starkregen dar. Es wird ebenfalls erwartet, dass es durch die Module zu einer verminderten Wärmeabstrahlung und damit zur Reduzierung der Blütenfrostdgefahr kommt. Ggf. kann dieser Effekt noch durch die Anbringung von Fliesen zwischen den Modulen verstärkt werden.

Um mehr auf die pflanzenbaulichen Bedürfnisse des angebauten Obstsortenspektrums eingehen zu können und insbesondere im Forschungsbetrieb der Obstbau-Anlage unterschiedliche spezifische Licht- und Mikroklimaverhältnisse innerhalb einer Wachstumsperiode zu ermöglichen, eignen sich nachgeführte Systeme (auch Trackingsysteme

genannt) besonders. In Valle et al. (2017) wird von 29 Prozent mehr Energie durch Trackingsysteme, verglichen zu stationären Systemen berichtet. Dieser elektrische Mehrertrag sinkt (ggf. auch unter den Energieertrag eines stationären Systems), wenn der Tracking-Algorithmus für den Pflanzenbau optimiert wird. In Deutschland sind Trackingsysteme nicht immer wirtschaftlich (Trommsdorff et al., 2021). Vor dem Hintergrund der Mehrkosten von Agri-PV-Systemen gegenüber wirtschaftlich konkurrierenden FFA musste zunächst untersucht werden inwiefern sich Trackingsysteme unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Vorteile, in Deutschland sinnvoll implementieren lassen. Ergebnisse hierzu sind den Kapiteln 3.5.2.2 und 3.5.2.3 zu entnehmen. Eine Alternative zu den Trackingsystemen bietet die Option Module mit unterschiedlicher Transparenz zu verwenden. So lassen sich spezifische Bereiche hinsichtlich Lichtangebot und Mikroklima anpassen und entsprechend untersuchen.

Es wird im vorgesehenen Projekt damit gerechnet, dass durch die Agri-PV-Anlage in Kombination mit dem Hagelschutz und dem Netz weniger Pflanzenschutzmittel eingesetzt werden müssen. Besonders bei der Hauptkrankheit in Apfel, dem Schorf, sowie bei zufliegenden Schädlingen, wie Wanzen und Apfelwickler, ist damit zu rechnen.

3.5.2 Machbarkeit

3.5.2.1 Umsetzungsvorschlag

Für die Umsetzung am Standort Augustenberg sind die in Tabelle A 4 gelisteten Arbeitspakete vorgesehen. Im Rahmen der Durchführbarkeitsstudie wurden bereits zahlreiche Fragen zur Umsetzung des geplanten Projektes am Standort Augustenberg bearbeitet. Neben einer Präzisierung der Erstplanung wurden die Kosten- und Ertragsabschätzungen der angedachten Systeme (semitransparente Module mit diversen Lichtdurchlässigkeiten, fest installierte Module oder ein Trackingsystem) erstellt, Wirtschaftlichkeit zur doppelten Landnutzung betrachtet und die relevanten nächsten Schritte im Rahmen der Projektentwicklung abgestimmt. Damit können Themengebiete wie Baurechtsplanung, Netzanschluss inkl. Mess- und Regelkonzept und statische Prüfung in den nächsten Phasen weiter präzisiert werden. Initiale Gespräche mit dem Regionalverband und baurechtlichen Entscheidungsträgern ergaben erste Eindrücke zur raumplanerischen Machbarkeit des Projektvorhabens und die Vorgehensweise im Baugenehmigungsverfahren. Seitens Netzbetreiber liegt eine positive Netzverträglichkeitsprüfung vor. Obwohl der Eigenverbrauchsanteil der Energieerzeugung sehr hoch ausfällt, finden derzeit Gespräche mit verschiedenen Energieversorgern zur Reststrom-Abnahme statt. Auch Gespräche zur externen Betriebsführung wie Wartung, Reparatur und Support sind mit lokalen Energieversorgungsunternehmen erfolgt.

Von Seiten des Technologiepartners erfolgte dabei die Ausarbeitung der technischen Konzeption in enger Abstimmung mit dem LTZ Augustenberg. Nach einem Vororttermin wurden die Anforderungen (z. B. Schutzfunktion, Lichtverfügbarkeit, Netzbefestigung) in regelmäßigen Teammeetings abgestimmt und konnten hinsichtlich der Umsetzungsmöglichkeiten in das technische Konzept einfließen. Dabei stand die Wahl der Unterkonstruktion im Fokus, sowie die mögliche Modulooption in Verbindung mit dem elektrischen Design. Die Erstplanung wurde kontinuierlich präzisiert und die Grundlage für die Budgetierung einer Umsetzung aktualisiert.

Die Kernobstanlage wurde bereits praxisorientiert für die spätere Integration eines Spindelsystem bzw. der Agri-PV-Unterkonstruktion angelegt. Der Aufbau einer Agri-PV-Anlage in eine bestehende Baumobstanlage wird daher notwendig. Die Erfahrungen im Projekt helfen bei einer raschen Umsetzbarkeit in die obstbauliche Praxis, da es wahrscheinlich ist, dass zukünftig auch bestehende Flächen nachgerüstet werden sollen.

Zu AP 2.1: Das Fraunhofer ISE erstellt Strahlungssimulation für die Agri-PV-Anlagen und arbeitet damit den PV-Technikpartnern zu. Auf Basis der Strahlungssimulationen werden die initial geschätzten Lichtverfügbarkeiten für die pflanzenbaulichen Kulturen und die prognostizierten Erträge bestätigt oder korrigiert. Diese Daten werden anschließend zur Optimierung der Ausrichtung und des Designs der Agri-PV-Anlagen genutzt. Das Arbeitspaket enthält Inputs für AP 2.2 kann aber wahrscheinlich erst im Oktober starten. Es werden zwei Monate Puffer zum Ende der Umsetzung von AP 2.2 angedacht, damit Inputs verarbeitet werden können.

Zu AP 2.2: Da die Unterkonstruktionen der Technikpartner schon einen gewissen Entwicklungsstand haben, müssen wahrscheinlich nur geringfügige Änderungen am Design vorgenommen werden. Allerdings kann es sein, dass nach Inputs aus der Statik-Planung die Rammtiefe etc. angepasst werden muss. Die Unterkonstruktionsentwicklung bildet die Basis für die Installation der Anlage (2.5).

Zu AP 2.3: Es gibt raumplanerische Bedenken hinsichtlich der Grünzäsur, welche auf der angedachten Agri-PV-Fläche lastet. Nach Rücksprache mit dem Regionalverband Mittlerer Oberrhein (RVMO) sind hier weitere Untersuchungen zum Vorgehen unter Absprache mit der Stadt Karlsruhe notwendig. Hierbei muss auch auf den Artenschutz geachtet werden. Grundsätzlich ist die offene Bauweise des angedachten Agri-PV-Systems und die generelle lichtdurchlässige Ausführung von Agri-PV-Systemen dem Fortbestand des Ökosystems dienlich. Im Rahmen des Projekts wird versucht die entsprechenden Untersuchungen in die Forschungsfragen zu integrieren, indem mit Umwelt- und Naturschutzbehörden zusammengearbeitet wird. Bei Genehmigungsfragen kann es zu starken Verzögerungen kommen. Im groben Zeitplan wäre zunächst ein Bodengutachten und parallel die Höhenvermessung nötig. Zeitgleich kann die Statik-Planung mit ersten Inputs aus der Unterkonstruktionsentwicklung (AP 2.2) anlaufen damit weitere Anforderungen schnell zurückkommuniziert werden können. Hier sind bereits Inputs des Bodengutachtens notwendig (z. B. Rammtiefe). Im direkten Anschluss werden Fachbeiträge von Naturschutz, Umweltschutz, Wasserwirtschaft etc. angefordert. Neben den baurechtlichen Verfahren muss bei Planung und beim Bau der Anlagen auf den Flächen des LTZ Augustenberg berücksichtigt werden, dass alle Bautätigkeiten, über die dem Finanzministerium unterstellte, Abteilung Vermögen und Bau Baden-Württemberg (VB-BW) abzuwickeln sind. Hier ist mit Verzögerungen in der Umsetzung zu rechnen. Auch der Anlagenbetrieb muss zwischen LTZ Augustenberg und VB-BW geregelt werden, was zu Verzögerungen führen kann. Erst nach erfolgreich beendetem Genehmigungsverfahren, welches mit der Dauer von einem Jahr konservativ abgeschätzt ist, kann mit der Installation (AP 2.5). begonnen werden.

Zu AP 2.4: Nachdem Netzverträglichkeitsprüfungen durch den verantwortlichen Netzbetreiber durchgeführt wurden (acht Wochen Laufzeit) muss eine Anfrage zur Inbetriebsetzung der Anlage beim Netzbetreiber eingereicht werden. Danach ist mit mindestens drei Monaten Wartezeit zu rechnen. Bei der Stromabnahme müssen Lösungen für den Eigenverbrauchsanteil und die Residualmenge gefunden werden. Am Standort LTZ Augustenberg ist die Mitwirkung von VB-BW für die Findung eines Geschäftsmodells notwendig.

Zu AP 2.5: Die Installation der Agri-PV-Systeme wird ungefähr sechs Monate dauern. Nach der Entwicklung der Unterkonstruktion wird ein Monat Puffer für die Planungen zugerechnet. Da am Standort LTZ Augustenberg bereits Obstbaum-Reihen angelegt wurden, derzeit aber auf das Spindelsystem verzichtet wurde, um die Agri-PV-Unterkonstruktion zu integrieren, ist eine Vorabininstallation der Unterkonstruktion wünschenswert. Die Unterkonstruktion würde bis zum Zeitpunkt der PV-Modulininstallation rein dem Zweck des Spindel-Anbausystems dienen und sollte daher keiner Genehmigung bedürfen.

Zu AP 2.5: Aufgrund der örtlichen Nähe zwischen LTZ Augustenberg und Goldbeck Solar ist eine ständige Optimierung inklusive des persönlichen Erfahrungsaustausches gegeben. Die Anlage ist über ein Monitoringsystem fernüberwacht. Die technischen Parameter der Agri-PV-Anlage werden dem Nutzer auf dessen Rechner zur Verfügung gestellt.

3.5.2.2 Technische Machbarkeit

Anforderungen

Für das Anforderungsmanagement wurde im Rahmen der Durchführbarkeitsstudie eine Anforderungsliste mit den wichtigsten Rahmendbedingungen erstellt. Der Katalog befindet sich im Anhang A in Tabelle A 1. Neben den Anbausystem- und Bearbeitungsmethoden-bedingten Anlagendimensionen wurde die Konstruktion insbesondere auf die Hauptanforderung Regenschutz und Hagelschutz ausgelegt. Die Ost-West-Ausrichtung der Anlage sorgt neben der bestehenden und geplanten PV-Anlagen des Standorts für einen höchstmöglichen Eigenverbrauchsanteil. Beiläufige Effekte der Verschattung durch PV-Überdachung, wie Hitze und Sonnenschutz, Verdunstungsminde- rung sowie Frostschutz, wurden ebenfalls berücksichtigt. Bei Agri-PV-Anlagen ist die Verschmutzungsneigung über landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen höher als bei FFA (Besson et al., 2017). Insbesondere im ökologischen Obstbau muss mit haftenden und intransparentem Pflanzenschutzmittelbelag auf den Modulen gerechnet werden. Da spezielle Reinigungseinheiten in der derzeitigen Projektentwicklung nicht enthalten sind werden erhöhte Reinigungskosten geschätzt. Die wichtigen Anforderungen für das Lichtmanagement sind in Abhängigkeit der verfügbaren photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) in Tabelle 5 für die Wachstumsphase von März bis September abgebildet.

Tabelle 5 Anforderungen an das Lichtmanagement unter Agri-PV Anlagen für den Apfel- und Birnenanbau.

Entwicklungsstadien	Anforderung PAR
Austrieb	März: 60 Prozent PAR (Austrieb verzögern, Spätfrostgefahr)
Triebzuwachs	April: 70 – 80 Prozent PAR (Verdunstungsminderung, Trockenstress-/ Spätfrostgefahr)
Zellteilungsphase / Blütenausbildung	Mai: 75 Prozent PAR (kritische Phase)
Junifruchtfall / Fruchtausdünnung	Juni: 70 Prozent PAR (Ausdünnung)
Fruchtreife	Juli - September: 70 - 80 Prozent PAR (Hitzeminderung für bessere Fruchtqualität, Reifesteuerung, Sonnenbrand)
Ernte	August - September: 60 - 75 Prozent PAR (Sonnenbrandschutz, Farbsteuerung)
Nach Ernte	Oktober - Februar: Stromertrag priorisieren

Außerdem gibt es standortspezifische Rahmenbedingungen in Bezug auf bestehende Energieerzeugungsanlagen, welche vorrangig berücksichtigt werden sollen. Hierzu zählen eine PV-Anlage auf dem Laborneubau mit 25 kWp Leistung und zukünftig geplante PV-Anlagen mit zusätzlichen 125 kWp Leistung. Hinsichtlich Messkonzept ist ein BHKW von 50 kW unter Volleinspeisung zu beachten.

Anlagendesign

Die Nutzung von flexiblen Trackingsystemen zur Lichtregulierung im Forschungsbetrieb und für den Anbau unterschiedlicher Obstsorten unter der gleichen Agri-PV-Anlage wurde in Abhängigkeit der Wirtschaftlichkeitsbetrachtung in Aussicht gestellt. Daher wurde eine Variante mit Trackingfunktionalität System »EW-Track« mit einer Variante ohne Trackingfunktionalität »EW-Fix« verglichen. In welchem Maß Module mit verschiedenen Transparenzgraden eine Rolle spielen wird ebenfalls beleuchtet.

Für die beiden Systeme »EW-Track« und »EW-Fix« wurde eine Flächenbelegungsrate (GCR) von 35 bis 45 Prozent angestrebt, damit wie in Willockx et al. (2020) beschrieben, ein optimaler Kompromiss zwischen Energieproduktion und landwirtschaftlichem Ertrag erreicht wird. Um dieses Ziel zu erfüllen, wurden für die ersten Berechnungen semitransparente Module (41,5 Prozent) verwendet. Eine weitere Variante »EW-Track-AT« sieht eine Antitrackingfunktionalität vor. Sprich »EW-Track-AT« funktioniert, wie ein nachgeführtes System, welches nicht dem Verlauf der Sonne folgt, sondern sich an den Lichtbedürfnissen der Pflanzen orientiert (Abschnitt *Systemfunktionalität* in diesem Kapitel). Mechanisch und kostentechnisch entspricht das System dem von »EW-Track«. In der Variante »EW-Track-AT-50« werden zusätzlich Module mit einer geringeren Transparenz (26,3 Prozent) verwendet. Damit wird eine höhere GCR von ca. 65 Prozent erreicht. Durch einen angepassten Antitrackingalgorithmus wird die PAR in der

Wachstumsphase angehoben, aber in Phasen, in welchen die Pflanzen eine hohe Verschattung tolerieren kann, ein höherer Stromertrag generiert werden. Leistungs- und Lichtdaten der Anlagenvariante wurden anhand GCR und Modultransparenz skaliert. In der Variante »EW-Fix-Var« haben die Hälfte der fixierten Module eine Transparenz von 32,5 Prozent und die andere Hälfte eine von 41,5 Prozent. Die resultierende durchschnittlich pflanzenverfügbare relative PAR wurde anhand des resultierenden GCR von ~59,2 Prozent zu 60 Prozent geschätzt.

Entsprechend der Baumreihenausrichtung des Spindelbauausbausystems wurde im Falle des fixierten Systems »EW-Fix« eine First-Überdachung der Bäume in Ost-West-Ausrichtung vorgesehen. »EW-Fix« ist in Fig. 9 schematisch dargestellt. Hagelnetze sollen so angebracht werden, dass sie entlang des Querbalkens (gelb dargestellt) nur in den Modulzwischenräumen Platz finden – d. h. keine bedeutende zusätzliche Verschattung verursachen. Beim Trackingsystem »EW-Track« ist keine Firstanordnung möglich. Stattdessen wird ein flacher Modultisch vorgesehen, der sich von West nach Ost neigen kann. In der Standard-Variante (siehe Abschnitt *PV-Ertragssimulation* des Kapitels) wird die gleiche GCR und dementsprechend das gleiche Lichtangebot in Horizontalstellung wie bei »EW-Fix« angenommen.

Die wichtigsten Design-Parameter der mechanischen Anlagendesigns sind in Tabelle 6 dargestellt. Hierbei ist »Süd-Referenz« eine vergleichbare PV-Freiflächenanlage mit Süd-Ausrichtung und Standard-Designparametern aus Stephan Schindele et al. (2020), welche auf der gleichen Fläche wie die Agri-PV-Systeme ohne gleichzeitigem Pflanzenbau Platz finden würde. Die Systemvariante wurde simuliert, um die Wirtschaftlichkeit mit Agri-PV-Systemen zu vergleichen, siehe Kapitel 3.5.2.3.

Tabelle 6 Designparameter verschiedener Agri-PV-Anlagentypen.

	EW-Fix	EW-Track	Süd-Referenz
GCR* [%]	35	35	47
Modultransparenz [%]	41,5	41,5	0
Bifazial	Nein	Nein	Nein
PAR-Ziel [%]	75	75	0
Ausrichtung [°] (N=0, E=90, S=180, W=270)	286 / 106	286 / 106	180
Neigungswinkel [°]	15	+45° / -45°	20
DC Leistung [kWp]	319	319	538

Das initiale Design wurde mittels Raytracing-Simulationen von dem Fraunhofer ISE überprüft. Die Ergebnisse für den Verschattungsgrad in der kritischen Phase im Mai sind in Fig. 9 dargestellt. Es ist erkennbar, dass die durchschnittliche Lichtverfügbarkeit von 75 Prozent PAR eingehalten werden kann.

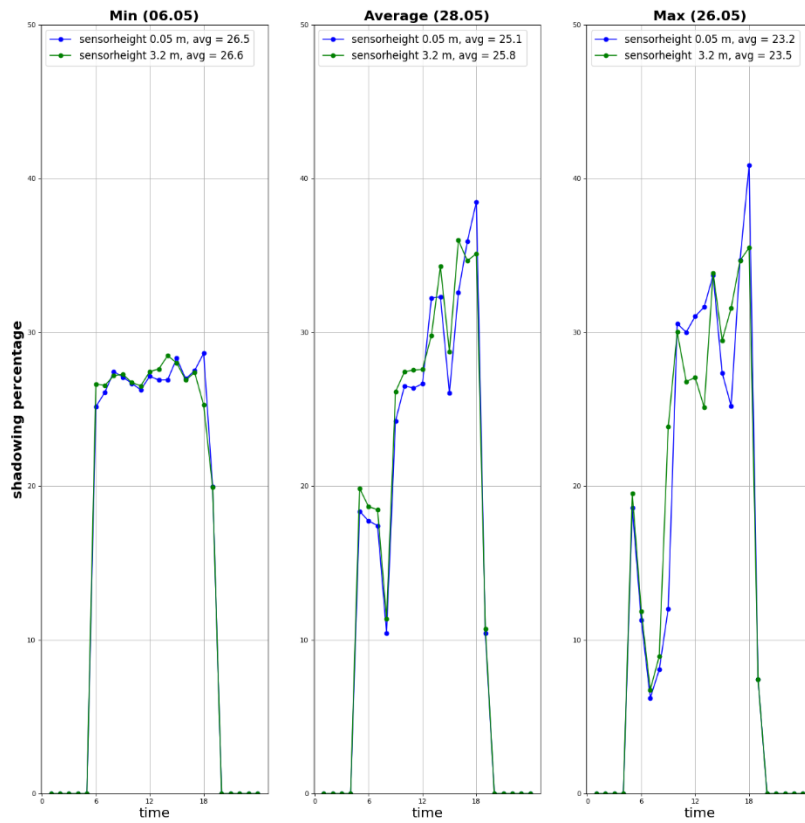


Fig. 9 Lichtverfügbarkeit an einen Tag mit geringer Einstrahlung (06.05.), mit durchschnittlicher Einstrahlung (28.05.) und mit hoher Einstrahlung (28.05.).

Systemfunktionalität

Wie in Willockx et al. (2020) beschrieben und in Kriedemann und Canterford (1971) bestätigt, wird für Birnenbäume eine PAR von 225 W/m^2 als CO_2 -Assimilations-Sättigungsgrenze angesehen. Der Mai, gemittelt von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang, liefert am Standort typischerweise etwa 426 W/m^2 Solarstrahlung bzw. 213 W/m^2 PAR. Bei 75 Prozent der PAR in der Variante »EW-Fix« werden also nur $\sim 160 \text{ W/m}^2$ erreicht. Im Grunde bedeutet dies bereits eine Lichtreduktion im Vergleich zur Assimilations-Sättigungsgrenze von 28,8 Prozent (71,2 Prozent der Sättigungsgrenze). In der Systemvariante »EW-Track-AT« wird daher ein Antitrackingalgorithmus angewandt, um die Lichtverfügbarkeit für die Obstbäume in der Wachstumsphase zu erhöhen.

Neben der durchschnittlichen Lichtverfügbarkeit spielen die Sonnenstunden eine wichtige Rolle im Pflanzenbau (Wang & Sun, 2018). Damit ein kontinuierlicher Charakter des Lichtangebots ermöglicht wird und immer genug Licht zur richtigen Zeit bei den Pflanzen ankommt, kann die Ausrichtung der Module anhand der gemessenen PAR unter freiem Himmel (PAR global, im Fig. 10 grüne Kurve – oberer Graphikteil) im Abgleich mit einem PAR-Level als Sollgröße erfolgen.

Bei Regelung des Antitrackingalgorithmus auf ein PAR-Level unterhalb des Tageshöchstwerts, würden morgens und abends bei Unterschreitung des PAR-Levels, die Module für mehr Lichtverfügbarkeit ausgerichtet werden. Somit kann beispielsweise im

Mai (kritische Zellteilungsphase) eine höhere durchschnittliche PAR erreicht werden als durch Auslegung mit fixierten Modulen möglich wäre. Dadurch ergibt sich die theoretische Möglichkeit eine höhere Flächenbelegungsrate als bei fixierten Systemen zu wählen. Wie in Fig. 10 dargestellt entsteht ein Verlauf des Antitracking-Ausrichtungswinkels (gelbe Kurve im oberen Graphikteil), welcher bei Schwachlicht (morgens, und abends) vom herkömmlichen Sonnenausrichtungswinkel (schwarze Kurve im oberen Graphikteil) abweicht.

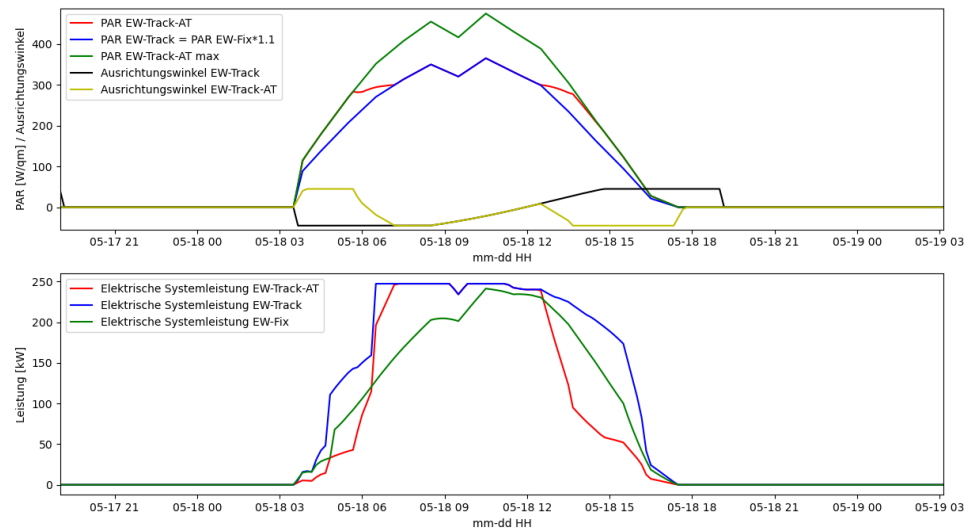


Fig. 10 Oben: Simulierte Ausrichtungswinkel der Varianten "EW-Track-AT" und »EW-Track«, sowie simulierte PAR-Levels auf Pflanzenebene je nach System; Unten: Leistungsverlauf der verschiedenen Systeme.

Die grüne PAR-Kurve im oberen Graphikteil beschreibt die maximale PAR-Ausbeute durch Antitracking und entspricht der vollen PAR aus der Globalstrahlung. Die blaue PAR-Kurve im oberen Graphikteil beschreibt das pflanzenverfügbare Licht unter herkömmlichem Sonnentracking, während die rote PAR-Kurve die Lichtverfügbarkeit unter pflanzenbaulich optimiertem Tracking (Antitracking) zeigt. Analog dazu kann die elektrische Systemleistung zwischen herkömmlichem Tracking (blau – unterer Graphikteil) und pflanzenbaulich optimiertem Tracking (rot – unterer Graphikteil) verglichen werden.

Technisches Forschungskonzept

Hinsichtlich des Forschungskonzepts wird die Antitrackingfunktionalität ausgenutzt, um verschiedene Mikroklima- und Lichtsituationen zu erzeugen. Damit können die Effekte der Agri-PV-Anlage auf Mikroklima und Pflanzenwachstum unter den verschiedensten Rahmenbedingungen abschätzt und zukünftige Agri-PV-Anlagen noch zielgerichteter entwickelt werden. Die gewonnenen Ergebnisse können im weiteren Verlauf zur Kalibrierung und Weiterentwicklung von Pflanzenwachstums (Ertrags)- und Landnutzungsmodellen genutzt werden. Im Zusammenschluss mit anderen Forschungsstandorten können die Erkenntnisse zu den biotischen und abiotischen Faktoren und deren Auswirkungen Kultur- und Anlagen-übergreifenden zu Einschätzung der Auswirkung von Agri-PV-Anlagen auf die Ertragsquantität und -qualität genutzt werden

Netzanschluss

Beim Netzbetreiber Stadtwerke Karlsruhe Netzservice wurde frühzeitig eine Netzverträglichkeitsprüfung in Auftrag gegeben. Netzverknüpfungspunkt ist die 20-kV-

Sammelschiene der kundeneigenen Transformator-Station. Die Prüfung hat ergeben, dass durch den Betrieb der zusätzlichen geplanten Erzeugungsanlage keine unzulässigen Netzrückwirkungen am Verknüpfungspunkt zu erwarten sind. Die zusätzliche Anlage kann somit über den bestehenden Netzanschluss des Objektes angeschlossen werden. Die Leistung von 319,2 kWp ist mit einer Begrenzung der Einspeiseleistung auf 250 kWp bis zum 23.06.2022 reserviert.

PV-Ertragssimulation

Um die technoökonomische Sinnhaftigkeit des Agri-PV Projekts in den verschiedenen Agri-PV Varianten zu vergleichen, wurde zunächst die rein photovoltaische Seite hinsichtlich Ertrag und Wirtschaftlichkeit simuliert und anschließend der Einfluss der landwirtschaftlichen Wertschöpfung und die Landnutzung entlang der DIN SPEC in die Betrachtung mitaufgenommen. Die verschiedenen Anlagendesigns wurden bis auf die Varianten «EW-Track-AT-...» mit der Software System Advisory Model (SAM) von NREL¹ simuliert. Alle Ergebnisse sind Durchschnittswerte der Simulationsdauer über 25 Jahre, wobei eine jährliche Leistungsminderung von 0,25 Prozent angenommen wird. Die Erträge der Varianten «EW-Track-AT-...» wurden nach der SAM-Simulation in einem am Staatlichen Weinbauinstitut Freiburg entwickelten Python-Skript manipuliert und zur Kostenrechnung wieder in SAM-Formeltabellen zurückgespielt. Leistungseinbußen auf der PV-Seite durch Antitracking, wie in Fig. 10 dargestellt, werden berücksichtigt.

Zur Simulation des PV-Eigenverbrauchs steht ein Lastgang von 2019 in 15-Minuten Auflösung zur Verfügung. Bestandsanlagen und geplante Anlagen werden mit Standardwerten aus Quatschning und Hanitsch (1998) (30° Anstellwinkel, Süd-Ausrichtung, GCR von 33,3 Prozent) berücksichtigt. Wetterdaten wurden Standortgenau aus European Commission (2021) genutzt.

Die Systemkosten für die Szenarien »EW-Track-AT...« sind dem System »EW-Track« gleich. »EW-Fix-Var« entspricht den Kosten von »EW-Fix«, da es innerhalb der angefragten Module vernachlässigbare Preisunterschiede gibt. Reinigungskosten von neun Euro pro Jahr und kWp wurden abgeschätzt und in den OPEX der Agri-PV Anlagen berücksichtigt. Das entspricht einer Reinigung aller 1.680 Module der 319 kWp Anlagen 6.000 € für alle zwei Jahre.

Sonstige wichtige Punkte:

- Die Mehrwertsteuer wurde nicht hinzugerechnet und wird als durchlaufender Posten betrachtet.
- Es gibt keinen Unterschied der Genehmigungskosten zwischen den Systemen und diese wurden anhand interner Informationen aus vergleichbaren Projekten geschätzt.
- Für Standardmodule (Süd-Referenz) ergeben sich 250 €/kWp (Schindele et al. 2020). (Hinweis: aufgrund der derzeitigen Versorgungslage können Preise stark nach oben abweichen)
- OPEX bei FFA sind unabhängig von den Reinigungskosten auf Grund der Zusatzkosten für das Mähen und der Kosten für nicht anderweitig nutzbares Land etwas höher (Richtwerte in Stephan Schindele et al. (2020) für eine 1-MW-Agri-PV-Anlage APV ~1,1 * CAPEX; FFA ~2,2 * CAPEX)

¹ National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy

Nachfolgend (Tabelle 7) sind die finanziellen Parameter der Ertragssimulation abgebildet. Die Stromkosten für das Szenario « VB-BW als Betreiber » (VB-BW als selbsterzeugender Letztverbraucher) wurden abgeschätzt und als Einsparpotenzial bei Eigenverbrauch, abzüglich der 40 Prozent der EEG-Umlagen, zugrunde gelegt. Alle weiteren Parameter lehnen sich an Werte aus Stephan Schindele et al. (2020) an. Die Stromkosten für die Ersparnisse am Eigenverbrauch eskaliert in der Simulation jährlich um ein Prozent. Beim Steuersatz wurden 30 Prozent angenommen. Für Szenario B) wird angenommen, dass der Eigenverbrauchsanteil des PV-Strom durch VB-BW zu den üblichen Konditionen abgenommen wird. Der externe Investor spart sich allerdings aufgrund der Abnehmernähe Stromsteuer und Netzentgelte, was in der Berechnung wie eine Einsparung am Eigenverbrauch behandelt werden kann.

Tabelle 7 Finanzielle Parameter.

	Strom- preis [ct/kWh]	Ersparnis – EV [ct/kWh]	Verschuldung [%]	WAC C [%]	Inflation [%]	Pacht
A) VB-BW als Betreiber	5	16,55	100	4.1	2	-
B) VB-BW als Stromabnehmer	5	8,94	100	3.1	2	-

Zur Berechnung der Gestehungskosten in Tabelle 8 und für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde nur Szenario A) aus Tabelle 7 »VB-BW als Betreiber« berücksichtigt

Tabelle 8 Ergebnisse der Ertragssimulation – VB-BW als Betreiber.

	EW-Fix	EW-Fix- Var	EW-Track	EW- Track-AT	EW- Track-AT- 50	Süd-Ref
kWh/Jahr	288.174	341.487	360.824	331.497	261.069	572.067
kWh/Wachstumsperiode	243.593	288.657	302.091	272.764	186.478	467.173
kWh/Wachstumsperiode*m ²	48,5	57,5	60,2	57,6	37,1	93,0
Spez. Ertrag [kWh/kWp]	901	903	1130	1039	643	1063
EV [%]	69,24	64,5	63,2	61,2	64,3	47,7
LCOE [ct/kWh]	15,05	13,17	14,14	15,5	19,2	6,01
DC Leistung [kWp]	319	378	319	319	407	538

3.5.2.3 Wirtschaftliche Machbarkeit

Für die Ergebnisse in Tabelle 8 wurden die Sowiesokosten für Apfel- und Birnenanbausysteme, d. h. für Drahtrahmenkonstruktion und Hagelnetze, nicht berücksichtigt. Diese Kosten werden durch den Unterkonstruktionskostenanteil der Agri-PV-Anlage ersetzt und können von den Agri-PV-Systemkosten abgezogen werden. Die Kosten für ~0,5 Hektar Apfelanlage mit Hagelnetzen können ohne Bäume zu ~8.500 € geschätzt

werden (Thomann & Lang, 2008), was im Vergleich zu den Unterkonstruktionskosten der geplanten Agri-PV-Anlagen nicht maßgeblich ist. Eine Analyse von Tabelle 8 zeigt, dass sich eine stärkere Flächenbelegung mit intransparenteren Modulen, ausgeglichen durch entsprechende Antitrackinggegenmaßnahmen nicht wirtschaftlich ist, da die Kosten pro kWp zu gewichtig sind.

Aus der Betrachtung der PAR lassen sich landwirtschaftliche Erträge in Abhängigkeit der Verschattung abschätzen. Dies erfolgt auf Basis der in Tabelle 8 aufgeführten Simulationsergebnissen sowie unter Verwendung auf Versuchsergebnissen aufbauenden Korrelationen zu pflanzenbaulichen Ertragsentwicklungen unter Verschattungsszenarien aus Trommsdorff et al. (2021). Pflanzen können hinsichtlich des Ertrages unter Verschattung in die drei Kategorien eingeteilt werden; »Minus« für eine deutliche Ertragsreduzierung, »Zero« für konstanten Ertrag und »Plus« für eine merkliche Ertragssteigerung durch Verschattung. Die Ergebnisse aus Klophaus und Baab (2015) zeigen, dass die Apfelsorte Gala der Kategorie »Plus«, Evelin der Kategorie »Minus« zugeordnet werden könnte. Die Sorte Elstar würde zur Kategorie »Zero« passen. Keine der beschriebenen Sorten findet sich im geplanten Anbauspektrum am Standort LTZ-Augustenberg. Aus den Simulationsergebnissen von Willockx et al. (2020) lässt sich per »linear Fit« ein Ertragsmodell für Birne ableiten (Fig. 11).

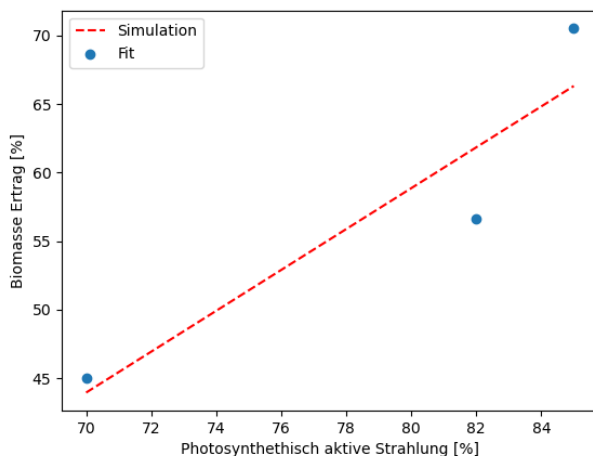


Fig. 11 Ertragsmodell »pear« für Birne mit Daten aus Willockx et al. (2020).

PAR_effektiv in Tabelle 9 zeigt die durchschnittliche effektive pflanzenverfügbare photosynthetisch aktive Strahlungsleistung in der Wachstumsphase (März bis September), welche primär durch die Flächenbelegungsrate (GCR) sowie die die Modultransparenz und sekundär durch das Antitrackingregime erreicht wird. Im Szenario »EW-Track-AT« wurde bei einem maximalen Neigungswinkel der Module von +/- 45° mittels Antitracking (AT) der relative PAR-Wert von 83,9 Prozent erreicht. Die absolute durchschnitts PAR für den Mai von 180 W/m² PAR wird damit getroffen. Die Leistungseinbußen in dieser Zeit (kWh/Wachstumsperiode), siehe Tabelle 8 sind allerdings bedeutsam. Der relative PAR-Wert gegenüber der PAR unter freiem Himmel wurde erreicht, indem ein PAR-Level-Schwellwert von 130 W/m² für die Antitrackingregelung genutzt wurde. Im Szenario »EW-Track-AT-50« hat die Simulationen gezeigt, dass die Lichterhöhung durch Antitracking nicht ausreichend ist, um 180 W/m² PAR in der kritischen Phase im Mai zu erreichen. Stattdessen wurde versucht die 160 W/m² PAR im Mai zu erreichen, welche ebenso in »EW-Fix« erreicht werden. Durch die Antitrackingregelung gelang es eine durchschnittlichen relativen PAR über die gesamte Wachstumsphase von 63,3 Prozent zu erzielen. Bei ein durchschnittlichen PAR im Mai von 213 W/m² ist klar, dass hier die Modulleistung enorm reduziert wird (kWh/Wachstumsperiode, siehe Tabelle 8). Die Wirtschaftlichkeit eines solchen Szenarios ist nicht gegeben.

Für die Berechnung der Landnutzungseffizienz (LER) und der Preis-Leistungsverhältnisses (PPR), (Erläuterungen siehe Schindele et al. (2020)), wird kein

Landverlust durch Aufständigung und Abspannung angenommen, da die Agri-PV Anlage an das bestehende Anbausystem angepasst ist. Für die Berechnung der PPR wurde ein Standorttypischer Ernteertrag von 30 t/ha Äpfel und 18 t/ha Birnen zugrunde gelegt – mit der Annahme, dass auf der Fläche 50 Prozent Birnen angebaut werden. Der Preis wurde auf durchschnittlich 2,50 € pro Kilogramm angesetzt. Bezogen auf die Agri-PV-Fläche von 5.021,5 m² wird eine Flächenleistung von 30.129,00 € für die PPR-Berechnung genutzt (Schindele et al. 2020). Des Weiteren werden PPR und LER nur über die Wachstumsphase evaluiert. Das bedeutet, wenn das ganze Jahr mit entsprechender PV-Energieerzeugung mitberücksichtigt würde, würden die Ergebnisse optimistischer ausfallen.

Tabelle 9 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse; Landnutzungseffizienz (Land Equivalent Ratio = LER), Biomasse Ertrag (Biomass Yield = BMY), Preis-Leistungsverhältnis (Price Performance Ratio = PPR).

	EW-Fix	EW-Fix-Var	EW-Track	EW-Track-AT	EW-Track-AT-50
PAR_effektiv [%]	75	60	82,5	83,9	63,3
LER_minus	1,43	1,44	1,59	1,56	1,24
LER_zero	1,5	1,52	1,64	1,62	1,33
LER_plus	1,65	1,7	1,76	1,73	1,50
LER_pear	1,04	0,91	1,28	1,26	0,74
BMY_minus [%]	90,3	81,9	93,8	94,3	83,9
BMY_zero [%]	98,4	90,7	99,4	99,5	93,4
BMY_plus [%]	113	107,8	111,6	111,1	109,7
BMY_pear [%]	51,4	29	62,6	64,3	34,0
PPR_minus	0,16	0,21	0,29	0,30	0,60
PPR_zero	0,15	0,19	0,28	0,28	0,28
PPR_plus	0,13	0,16	0,25	0,26	0,24
PPR_pear	0,44	0,6	0,29	0,44	0,77

Es ist bemerkenswert, dass die ökonomische Sinnhaftigkeit des Erhalts des Obstbaus unter dem Agri-PV-System trotz der erheblichen Stromgestehungskosten (LCOE) in allen Fällen gegeben ist. Grund dafür ist die Wertigkeit der Apfel- und Birnenkulturen unter dem APV-System welche einen großen Teil der Flächenwertschöpfung ausmachen. Zum Beispiel liegt die obstbauliche Flächenwertschöpfung im pessimistischen Szenario PPR_pear in »EW-Track-AT« bei 37.722 € und die Wertschöpfung aus PV-Stromerzeugung bei 51.020 €.

Finale Systemdefinition

Teilprojekt Kernobst

Fördermittelgeber entscheiden über Förderhöhe und System-Variante. Die Forschungstauglichkeit der Trackingsysteme ist wesentlich höher und sollte daher priorisiert werden. »EW-Track-AT-50« kann aufgrund der nachteiligen Wirtschaftlichkeit im Vergleich zu »EW-Track-AT« ausgeschlossen werden.

Förderbedarf

Die genannten technischen und ökonomischen Projektrisiken – insbesondere die entstehenden Entwicklungskosten – stehen wertvollen gesellschaftlichen Potenzialen gegenüber. Der so begründete den Forschungsbedarf ist nur durch eine Projektförderung bedienbar. Ein wirtschaftliches Projekt ergibt sich ohne Skalierungseffekte und ohne EEG-Förderung unter folgenden Förderbedingungen:

Tabelle 10 Förderbedarf der ausgewählten Varianten (Part I).

	<i>EW-Track</i>		<i>EW-Fix</i>	
	[%]	[€]	[%]	[€]
Gesamteinnahmen über 5 Jahre		225.628		187.273
Restförderbedarf	64	660.736	65	569.276
Gesamteinnahmen über 10 Jahre		451.257		374.546
Restförderbedarf	47	482.494	48	421.132
Gesamteinnahmen über 15 Jahre		676.885		561.819
Restförderbedarf	30	304.251	31	272.988
Gesamteinnahmen über 20 Jahre		902.514		749.092
Förderbedarf (Standzeit 20 Jahre)	12	126.009	14	124.845
Gesamteinnahmen über 25 Jahre		1.128.142		936.364
Förderbedarf (Standzeit 25 Jahre)	-5	-52.234	-3	-23.299

Tabelle 11 Förderbedarf der ausgewählten Varianten (Part II).

	<i>EW-Track-AT</i>		<i>EW-Fix-VAR</i>	
	[%]	[€]	[%]	[€]
Gesamteinnahmen über 5 Jahre		214.575		221.919
Restförderbedarf	65	671.789	60	541.838
Gesamteinnahmen über 10 Jahre		429.151		443.838
Restförderbedarf	49	504.600	41	366.256
Gesamteinnahmen über 15 Jahre		643.726		665.757
Restförderbedarf	33	337.410	21	190.674
Gesamteinnahmen über 20 Jahre		858.302		887.676
Förderbedarf (Standzeit 20 Jahre)	17	170.221	2	15.092
Gesamteinnahmen über 25 Jahre		1.072.877		1.109.595
Förderbedarf (Standzeit 25 Jahre)	0	3.032	-18	-160.490

Für das LTZ Augustenberg ist eine Sachbearbeiterstelle (gD, E 11) für drei Jahre (= 36 PM) vorgesehen. Daraus würden sich Personalkosten von insgesamt 214.200 € ergeben. Nachfolgende Tabelle 12 enthält die Gesamtaufstellung der Projektvorkalkulation.

Tabelle 12 Kostenkalkulation des Projekts für den Standort LTZ Augustenberg.

	EW-Fix	EW-Track	EW-Fix-VAR	EW-Track-AT	Goldbeck Solar
PM	36	36	36	36	9
Personalkosten /Monat [€]	6.500	6.500	6.500	6.500	8.000
Personalkosten gesamt [€]	234.000	234.000	234.000	234.000	72.000
Materialkosten + Sachleistungen [€]	20.000	20.000	20.000	20.000	
Reisekosten [€]	5.000	5.000	5.000	5.000	15.000
Förderquote [%]	100	100	100	100	50
Kosten APV-Prototyp [€]	873.936	1.028.523	902.768	1.028.523	
Förderbedarf Prototyp [€]	124.845	126.009	15.092	170.221	
Förderanteil Prototyp [%]	14	12	2	17	
Gesamt Kosten [€]	1.132.936	1.287.523	1.161.768	1.287.523	87.000
Förderquote gesamt [%]	34	30	24	33	50
Förderung [€]	383.845	385.009	274.092	429.221	43.500

3.5.2.4 Risikobewertung

Für die Landesliegenschaft Augustenberg ist die Regionalstelle Karlsruhe von Vermögen und Bau des Landes Baden-Württemberg zuständig. Sämtliche Bauangelegenheiten, zu denen auch die Errichtung einer Agri-PV-Anlage gehört, befinden sich in deren Verantwortung. Voraussetzung für die Betreuung einer Agri-PV-Anlage durch Vermögen und Bau in Karlsruhe ist die Zustimmung der Betriebsleitung in Stuttgart. Gegenwärtig wird dort aufgrund der in der Machbarkeitsstudie erhobenen Daten die Wirtschaftlichkeit für den Standort geprüft. Die Entscheidung über eine Unterstützung des Vorhabens seitens VB-BW steht gegenwärtig noch aus.

Weiterhin gibt es raumplanerische Bedenken für den Standort Augustenberg, da obstbauliche Versuchsfläche des LTZ Augustenberg in einer Grünzäsur liegt. Die Prüfung von möglichen Alternativstandorten ergab nachstehende Bewertung, die nicht zum Ausweichen auf andere landeseigene Flächen führt:

Grötzingen

Das Land Baden-Württemberg verfügt in Grötzingen über mehrere Flächen, die zum größten Teil langfristig verpachtet sind. Dabei ist aber auch eine Fläche, die vom LTZ Augustenberg als ackerbauliches Öko-Versuchsfeld Augustenberg bewirtschaftet wird. Die Fläche hat eine Größe von ca. fünf Hektar und wäre grundsätzlich ausreichend groß, eine Kernobstanlage mit Agri-PV zu betreiben. Gegen die Nutzung dieser Fläche für den Kernobstanbau spricht, dass sie deutlich stärker spätfrostgefährdet ist als die Lage am Augustenberg. Es ist dort innerhalb der Projektlaufzeit von deutlich mehr Ausfalljahren zu rechnen, was die Bewertung der pflanzenbaulichen und pflanzengesundheitlichen Fragen in Kombination mit Agri-PV stark einschränkt. Weiterhin ist der Standort grundwassernah und in nassen Jahren ist er für Kernobst ausgesprochen ungeeignet, da das verstärkte Auftreten pilzlicher Erreger, wie Obstbaumkrebs oder Krautfäule, rasch zum Absterben der Bäume führen können. Bekämpfungsmöglichkeiten gegen diese Krankheiten stehen nur sehr eingeschränkt oder gar nicht für den Ökoobstbau zur Verfügung. Die Eigenschaften des Standortes sprechen somit gegen die Pflanzung einer Kernobstanlage. Die Fläche ist weiterhin ca. drei Kilometer vom Augustenberg entfernt. Die Bewirtschaftung der Anlage mit regelmäßigen Kulturarbeiten sowie Personal und Logistik würde einen erheblichen Mehraufwand an Zeit und Organisation (Mehrfahrten) bedeuten. Um die Bewirtschaftung am Augustenberg nicht einzuschränken, wären zusätzliche Anschaffungen (z. B. Transportfahrzeug für Erntegut, PKW) notwendig. Weiterhin hat der ackerbauliche Pflanzenbau erhöhten Flächenbedarf an Versuchsflächen, was ebenfalls gegen eine Änderung in eine obstbauliche Nutzung spricht.

Forchheim

In Rheinstetten-Forchheim, der ackerbaulichen Außenstelle des LTZ Augustenberg, befinden sich Versuchsflächen, die für verschiedene Fragen im Ackerbau genutzt werden. In Rheinstetten-Forchheim befindet sich außerdem der Reiserschnittgarten (Basisquartier für die Vermehrung von Obstgehölzen). Es ist aus phytosanitären Gründen vorgeschrieben, dass im Umfeld eines Reiserschnittgartens keine Obstgehölze stehen dürfen. Die Landesflächen befinden sich in diesem Radius. Gegen den Standort Forchheim spricht weiterhin die Entfernung zum Augustenberg. Die Argumentation entspricht der vom Standort in Grötzingen. Zusätzlich müssten jedoch vor Ort Maschinen, Geräte, Erntelogistik, wie z. B. Kühllager, für den Obstbau vorgehalten werden. Ein ständiger Transport vom und zum Augustenberg ist nicht zu vertreten.

Am Standort Augustenberg wurde innerhalb der Flächen, die im Rahmen der Teilumstellung auf ökologischen Obstbau neu erstellt wurden, eine Kernobstanlage aufgestellt. Schwerpunkt waren hierbei gegenüber Schorf robuste oder tolerante Apfelsorten sowie zwei Sorten Birnen, die jeweils für den Markt aktuell sind oder zukünftig eine Rolle spielen werden. Die Kernobstanlage ist bereits praxisorientiert erstellt und der Aufbau einer Agri-PV-Anlage in eine bestehende Baumobstanlage bietet eine rasche Umsetzbarkeit in die obstbauliche Praxis, wenn bestehende Flächen nachgerüstet werden können.

Durch den praxisnahen Aufbau der Agri-PV-Anlage in Kombination mit der Obstanlage ist eine rasche Umsetzung in die Praxis bei Übernahme der Eigentümerschaft gewährleistet und bestehende Anlagen können nachgerüstet werden. Bei Nichtübernahme der Eigentümerschaft der geplanten Agri-PV-Anlage durch VB-BW sowie bei Beibehaltung der Grünzäsur ist das Projekt am Standort Augustenberg nicht umsetzbar.

3.6 Standort Kressbronn – Praxisanlage

Herr Bernhard arbeitet stets daran den Hof zukunftsfähig und nachhaltig zu bewirtschaften, um eine Übergabe an die nächste Generation sicher zu stellen und erprobt regelmäßig innovatives Feldbearbeitungsgerät. Als nächster Schritt zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels als auch zur Dekarbonisierung des lokalen Strommix ist im Zuge des Forschungsprojektes eine Agri-PV-Anlage geplant. Die Anlage in Kressbronn soll, nach aktuellem Wissensstand, europäisch einmalig in eine Bestandsanlage integriert werden, was den Bau und insbesondere die Fundamentierung deutlich komplexer gestaltet. Sollte sich die Maßnahme als praktikabel erweisen, wäre das Potenzial einer schnellen Implementierung von Agri-PV im Apfelbau deutlich vergrößert. Von anderen Anlagen grenzt sich das geplante Projekt auch durch die Sortenwahl Gala und das einzigartige Mikroklima der Bodenseeregion ab. Auf den Flächen des Obsthofes Bernhard in Kressbronn ist die Umsetzung einer Praxisanlage mit einer Leistung von 210 -280 kWp geplant, die vom KOB rudimentär agrarwissenschaftlich begleitet wird. Der Standort setzt sich aus zwei Teilflächen im konventionellen Obstbau zusammen.



Fig. 12 Lage des Landwirtschaftsbetrieb Hubert Bernhard in Kressbronn. Das ausgewählte Feld ist rot eingrahmt.

3.6.1 Machbarkeit

Die für die Agri-PV vorgesehene Fläche ermöglicht eine einfache Anbindung an das Niederspannungsnetz. Da der Landwirt einen Teil der Anlage selbst finanzieren wird, liegt der Investitionsbedarf aus Fördermitteln niedriger als bei den Versuchsanstalten. Dem Landwirt, Herrn Bernhard, liegen aktuell vier Angebote für eine Agri-PV-Anlage inklusive Montage und Anschluss auf der DC-Seite vor. Die Hersteller betonen, dass auf Grund der aktuellen Liefersituation, vor allem im Stahlbereich, ein detailliertes Angebot erst nach Festlegung des Ausführtermins erfolgen kann. Dieser ist vom Zeitpunkt der Projektgenehmigung abhängig.

Die individuellen Angebote können in diesem Rahmen nicht veröffentlicht werden. Der Landwirt wünscht sich ein System, welches sich durch eine dezente und schmale Auslegung gut in die Umgebung einfügt. Dies soll insbesondere in der touristisch relevanten Bodenseeregion die Akzeptanz steigern. Die Breite der Reihen soll der von Hagelschutznetzen gleichen. Beim Bau der Anlage darf das Wurzelwerk der Bestandsanlage nicht maßgeblich verletzt werden.

Es bestehen nach einem Treffen mit Regionalverbandsvorsitzendem Wilfried Franke keine raumordnerische Bedenken. Der Netzanschluss sowie die Stromabnahme sind über den Energieversorger und Projektpartner Regionalwerke Bodensee gesichert, eine Stromabnahme zum Tarif > 6 ct wurde zugesichert. Des Weiteren gab es Kontakt und Vorbesprechungen mit der Gemeindeverwaltung Kressbronn, dem Bauamt Kressbronn, dem Umweltamt (LRA Bodenseekreis), dem Amt für Wasser- und Bodenschutz (LRA Bodenseekreis) und dem Landwirtschaftsamt (LRA Bodenseekreis). Von allen Ämtern wurde zurückgemeldet, dass einer Genehmigung im Zuge eines Pilotprojektes zugestimmt werden kann. Auch der Bürgermeister unterstützt das Projekt. Für das Bauvorhaben in Kressbronn konnte kein Risiko festgestellt werden, es kann nach aktuellem Planungsstand zeitnah im Herbst dieses Jahres begonnen werden.

Die Intensivierung beim Beerenobst hat in den vergangenen Jahren zu einem starken Wandel im Anbau und der Verfügbarkeit von Beeren geführt. Der sogenannte »geschützte Anbau« unter Überdachungssystemen oder in Folientunneln hat stark zugenommen. Der überdachte Anbau bietet Produktionssicherheit und eine jahreszeitlich verlängerte zuverlässige Marktbelieferung. Vor allem große Betriebe (> 20 Hektar) schlagen diesen Weg ein. Die ersten Folientunnel wurden in den 1990er Jahren bei Erdbeeren aufgestellt. Die Verbreitung beschränkte sich zunächst auf die Frühgebiete der Rheinebene (damals etwa 120 Hektar). Beschleunigt durch immer häufigere Wetterextreme und gestiegene Qualitätsanforderungen des Handels wurden 2018 bereits 2.000 Hektar Beeren unter Dach angebaut.

Vor allem Strauchbeeren (speziell die Heidelbeere) konnten ihre Marktanteile ausbauen und sind mittlerweile kein reines Saisonprodukt mehr, sondern ganzjährig im Handel zu finden. In Deutschland werden rund 10.000 Hektar Strauchbeeren angebaut, davon bereits 1.000 Hektar im geschützten Anbau. In Baden-Württemberg beträgt die Fläche des Strauchbeerenanbaus rund 1.500 Hektar. Auch der Anbau von Terminkulturen, insbesondere bei Himbeeren, hat stark zugenommen. In Kombination mit dem geschützten Anbau hat sich der Anteil an Substratkulturen in allen Beerenarten stark erhöht. In den 2010er Jahren rückte außerdem das Thema Arbeitswirtschaft immer mehr in den Fokus der Betriebe. Durch die Einführung eines allgemeinen Mindestlohns im Jahr 2015 und den zunehmenden Arbeitskräftemangel, ist die Einsparung von Arbeitsstunden zu einem entscheidenden Erfolgsfaktor geworden.

Mit der Intensivierung des Anbaus erhöht sich nicht nur die Geschwindigkeit des Umtriebs, auch die Anforderungen an die Technik und die fachlichen Kenntnisse haben deutlich zugenommen. Substrate müssen den Anforderungen der Kultur entsprechen, bei der Düngung sind nicht mehr nur die Hauptnährstoffe von Bedeutung, sondern alle Nährstoffe müssen bedarfsgerecht in den Wurzelraum gebracht werden. Dies erfolgt überwiegend durch die Flüssigdüngung zusammen mit dem Bewässerungswasser. Nicht zuletzt aufgrund des Arbeitskräftemangels und gestiegener Lohnkosten wird in Automatisierung und computergestützte Systeme investiert.

Die zunehmende Flächenknappheit sowie Nachbauprobleme haben neben dem Ziel einer frühen Ernte den Trend zum bodenunabhängigen Anbau von Erdbeeren im Tunnel verstärkt. Realisiert wird dies als Substratanbau auf Dämmen oder direkt in Substratsäcken auf dem Boden oder auf Stellagen. Damit ist die Terminkultur sowohl bei Erdbeeren wie auch Himbeeren möglich. Die Kombination von Sommersorten und remontierenden Sorten mit Freilandkultur und geschütztem Anbau bis hin zum Gewächshaus ermöglicht bei Himbeeren ein Ganzjahresangebot. Unter Folientunneln lässt sich bei der Topfkultur von Heidelbeeren eine sichere Verfrühung von rund drei Wochen erreichen.

Große Vorteile haben geschützte Anbauverfahren bei der Abwehr von Schaderregern. Da Pflanzen und Früchte nicht dem Regen ausgesetzt sind, können verschiedene Pilzkrankheiten vermieden bzw. reduziert werden. Der Einsatz von Nützlingen wie etwa gegen Spinnmilben und Läuse ist leichter möglich. Andererseits muss mit dem Einsatz von Hummelvölkern die Bestäubung unterstützt werden.

In der vorliegenden Studie wurde die Durchführbarkeit von Agri-PV-Anlagen an zwei Standorten evaluiert. Die Vorarbeiten bezieht sich auf die Standorte *Heuchlingen* (Kapitel 4.4) und *Waldkirch* (Kapitel 4.5) und sollen von der Lehr- und Versuchsanstalt für

Wein- und Obstbau (LVWO) wissenschaftlich begleitet und betreut werden. Während sich in Waldkirch die Standortwahl als kompliziert herausgestellt hat, liegen in Weinsberg schon konkrete Umsetzungsvorschläge vor.

4.1 Ziele

4.1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Aufgrund der historischen Entwicklung des Beerenanbau liegen bereits viele Erfahrungen zur Kulturführung unter Überdachungen vor. Viele Überdachungskonstruktionen sind technisch bereits so massiv ausgeführt (Stahlrohrkonstruktionen), dass sie sehr lange Standzeiten ermöglichen (10 - 20 Jahre), was für eine PV-Auflage von großem Vorteil ist. Im vorliegenden Projekt gilt es die Kenntnisse der Kulturführung von Folienüberdachungen unter den technischen Bedingungen von PV-Überdachungen anzuwenden, bzw. die PV-Technik an die Erfordernisse der Kulturen anzupassen.

Die Eignung verschiedener Beeren soll mit diesem Projekt bewertet und mögliche Ertragsseinbußen quantifiziert werden. Ziel ist es die Unterkonstruktion der Schutznetze als Aufständigung für die PV-Anlage zu nutzen oder den Anbau durch ein neues Agri-PV System zu ergänzen. Eine aus landwirtschaftlicher Sicht und optimale Auslegung wird erarbeitet und anschließend untersucht. Das natürliche Vorkommen verschiedener Beerenarten an lichtarmen Standorten lassen auf eine relativ hohe Schattentoleranz rückschließen. Inwiefern diese Eigenschaft auch in züchterisch veränderten Himbeersorten zu finden ist, soll mit der agrarwissenschaftlichen Begleitforschung am Standort LVWO, erörtert werden. Daneben wird der Fragestellung nachgegangen, in welchem Maß der Einsatz von PV-Modulen geeignet ist, den Eintrag von Mikroplastik in den Boden zu reduzieren.

Eine Variante des Projekts sieht vor neue Ansätze für die PV-Module zu erproben. Die am Fraunhofer ISE in Forschung und Entwicklung befindlichen organische PV-Folien (OPV) sind eine vielversprechende Technologie für die Agri-PV, da sie unterschiedliche Transmissionsgrade erzielen und Licht spektralselektiv nutzen können. Für die Photosynthese notwendiges Licht steht den Pflanzen somit weitestgehend vollständig zur Verfügung. Da eine wirtschaftliche Umsetzung noch nicht möglich ist, soll eine Pilotanlage mit einer Leistung von 10 kWp (200 m²) errichtet und beforscht werden.

4.1.2 Beschreibung & Ziele aller Projektpartner

4.1.2.1 Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau (LVWO)

Die Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau (LVWO) beschäftigt sich als Einrichtung des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR) mit Fragestellungen rund um den Wein- und Obstbau. Sie ist auf den Anbau von Kirschen- und Beerenobst spezialisiert und kultiviert seit zirka 20 Jahren Süßkirschen und Himbeeren unter Überdachungsfolien, da diese besonders fäulnis anfällig sind. Das Obstversuchsgut (OVG) Heuchlingen befindet sich in der Obstregion Neckar bei Bad Friedrichshall. Auf 34 Hektar Fläche werden dort alle in Baden-Württemberg anbauwürdigen obstbaulichen Kulturen angebaut. Diese Kulturvielfalt ist notwendig, um dem Ausbildungsauftrag der LVWO in den Bildungsbereichen Duales Studium, Techniker- und Meisterausbildung sowie der Erwachsenenfortbildung nachzukommen. Zu dem Bildungsauftrag der LVWO gehört es auch neue Techniken der Obsterzeugung und Vermarktung zu testen und sie der Anbaupraxis in einem für sie umsetzbaren Format zu präsentieren. Neben anbautechnischen Fragen bearbeitet die

LVWO auch betriebswirtschaftliche Aspekte der jeweiligen Investitionen. Das OVG Heuchlingen beschäftigt sich seit längerem mit der PV-Nutzung. Für das 400-Tonnen-Kühlager des Betriebes werden hohe Energiemengen benötigt. Zusammen mit dem Amt für Vermögen- und Bau Heilbronn wurden daher bereits Investitionen in PV-Anlagen auf den Hallendächern getätigt und weitere folgen (siehe Luftbild). Ebenso wurde ein 5.000 Liter Tiefkältespeicher beschafft, um den anfallenden Strom in Form von Kälte für den anschließenden Verbrauch bei der Obstkühlung zu speichern. Aufgrund dessen ist die notwendige Infrastruktur (Stichwort Leitungsdimensionen) für eine Agri-PV-Anlage weitgehend vorhanden. Das OVG Heuchlingen verbraucht aktuell 250 MWh Gesamtstrom, über das Stromnetz werden 160 MWh bezogen, die aktuelle Eigenversorgung beträgt 60 MWh.

4.1.2.2

Obst- und Beerenanbau Schwehr

Das Unternehmen wurde 1959 von Walter Schwehr gegründet, der mit Ackerbau, Weinbau, Schweinemast und dem Anbau von Erdbeeren begonnen hat. Im Jahr 1984 übernahm Georg Schwehr das 37 Hektar große Unternehmen. Zwei Jahre später entstand die erste Produktionsfläche von Himbeeren später kamen Johannisbeeren, Tafeltrauben und Brombeeren hinzu. 2006 siedelte der Betrieb in die Langgasse in Waldkirch – Buchholz um. 2007 begann man mit den ersten Tunnelerdbeeren, damit diese bereits ab Mitte April angeboten werden können. Heute werden auf 100 Hektar Erdbeeren, Himbeeren, Brombeeren, Kirschen, Apfel, Johannisbeeren, Tafeltrauben, Wassermelonen, Mini Kiwis und Aprikosen kultiviert. Der Betrieb entwickelt sich ständig weiter und versucht bestmöglich den Anforderungen, der Verbraucherinnen und Verbraucher, der Händlerinnen und Händler, der Behörden und natürlich der Umwelt gerecht zu werden. Ein weiterer Schritt in Richtung Nachhaltigkeit soll durch Agri-PV erfolgen.

4.1.2.3

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)

Eine detaillierte Beschreibung des Instituts und seiner Ziele findet sich in Kapitel 3.1.2.6. Auf dem Gebiet der organischen Photovoltaik (OPV) verfügt das Fraunhofer ISE über 15 Jahre Erfahrung. In verschiedenen öffentlich geförderten Projekten, aber auch in direkter Zusammenarbeit mit der Industrie, wurde kontinuierlich an Zell- und Modulkonzepten gearbeitet, die eine kostengünstige Produktion in Rolle-zu-Rolle Verfahren ermöglichen sollen. Ein Rolle-zu-Rolle Prozess für nicht transparente OPV-Module ist etabliert, derzeit wird an der Umsetzung auf transparente Module gearbeitet.

4.1.3

Projektkoordination

Die Tabelle 13 zeigt eine Übersicht der beiden Standorte des Teilprojektes. Die LVWO übernimmt die wissenschaftliche Betreuung am Standort Waldkirch.

Tabelle 13 Übersicht über die Standorte Heuchlingen und Waldkirch.

	Heuchlingen	Waldkirch
Projektleitung	LVWO	LVWO
Betrieb	Forschung	Praxis
Anlagendesign	Fixed, V-förmig	<i>unbekannt</i>
Beerenkulturen	Him-, Johannis-, Heidel-, Erdbeeren	Him- und Erdbeeren
Anlagengröße	132,84 kWp	<i>unbekannt</i>

4.2 Stand der Wissenschaft

Auswirkungen von Überdachungen auf die Temperatur

Moderne Gewächshausfolien, welche überwiegend in den Überdachungs-/Tunnelsystemen des Beerenanbaus eingesetzt werden, bieten eine Lichtdurchlässigkeit von 80 Prozent, eine UVB-Durchlässigkeit von zirka 70 Prozent und halten etwa fünf Jahre. Durch den geschützten Anbau ändert sich das Kleinklima für die Kultur. Je nach Konstruktion liegt die Höchsttemperatur unter Folie bis 7 °C über der der Temperatur im Freiland. Da im Hochsommer die Temperaturen im Freiland bereits über 25 °C liegen, beeinflussen die erhöhten Temperaturen in einem überdachten bzw. geschlossenen System das Verhalten der Pflanzen. Zu diesem Sachverhalt unter Foliendächern liegen bereits viele Untersuchungen vor (Krüger, 2015) Es ist jedoch zu prüfen, inwiefern sich diese Erkenntnisse auf Agri-PV-Überdachungen übertragen lassen.

Auswirkungen von Überdachungen auf die Entwicklungen von Schaderregern

Durch den Anbau unter Dach sind die Temperaturen im geschützten Anbau höher und die Laubwand trockener. Diese Faktoren begünstigen das Auftreten von Insekten wie Blattläusen und vor allem Spinnmilben. Bei den Himbeeren sind es vor allem die große und die kleine Himbeerblattlaus, die durch das Einbringen von natürlichen Gegenspielern bekämpft werden müssen. Hierzu zählen Marienkäfer, Schweb- und Florfliegen sowie Falten- und Schlupfwespen. Spinnmilben können durch verschiedene Raubmilbenarten sowie Gallmücken und Blumenwanzen in Schach gehalten werden (Schneller, 2013). Die Populationen der jeweiligen Schaderreger müssen kontinuierlich erfasst werden, um rechtzeitig durch den Zukauf und die Einbringung der entsprechenden Nützlinge gegensteuern zu können. Hierfür gibt es ein spezielles Beratungsangebot (Hilgensloh, 2013). Auch hier ist zu prüfen, inwiefern sich diese Erkenntnisse auf Agri-PV-Überdachungen übertragen lassen.

Auswirkungen von Überdachungen auf das Wassermanagement der Kulturen

Der Anbau von Beerenobst unter Dach findet zunehmend als sogenannte »erdelose Kultur« statt. Darunter versteht man den Anbau in Rinnen oder Töpfen, die mit Substraten wie Torf oder Kokosfaser gefüllt sind. Das Wurzelvolumen dieser Containerkultu-

ren ist daher begrenzt, es muss deshalb bewässert aber auch entwässert werden und Nährstoffe werden über flüssige Düngemittel zugeführt. Zu diesem Sachverhalt und der Steuerung der Komponenten gibt es bereits viele Studien (Rupp, 2013). Im Gegensatz zu Folienüberdachungen ermöglichen Agri-PV-Module das Auffangen von Regenwasser, welches aufgrund seiner Wasserhärte besser für Bewässerungszwecke geeignet ist als Brunnenwasser. Durch ein geschlossenes System der Sammlung von Regenwasser, Be- und Entwässerung kann mit Düngemittel angereichertes Wasser recycelt und damit die Umwelt geschont werden (Stichwort Nährstoffaustrag). Die benötigte Energie für die Pumpen, Dosatron und die Steuerungsanlage liefert die Agri-PV-Anlage selbst. Hierbei ist zu prüfen welche Substrate unter Agri-PV-Anlagen verwendet werden können, welche Synergieeffekte zwischen der Agri-PV-Anlage und der Wasseraufbereitung erzielt werden und wie die Wasserqualität durch Nutzung des Dachwassers optimiert werden kann.

Vorhandene Agri-PV Anlagen im Beerenbau

Die BayWa r.e. hat in den Niederlanden bereits einige Agri-PV-Anlagen im Beerenbau umgesetzt. Nach Aussagen der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von BayWa r.e. führten veränderte mikroklimatische Bedingungen bei der Himbeere zu einem geringeren Bedarf an chemischen Maßnahmen - vermutlich verringerten kürzere Blattnässphasen den Schweregrad verschiedener Pilzkrankheiten. Dies könnte automatisch die Anzahl und Vielfalt der Nützlinge im Feld erhöht haben. Ein hohes Maß an mäßiger Beschattung (50 Prozent des PAR) ist mit einem stark reduzierten Wasserbedarf der Pflanzen während Hitzeperioden verbunden (BayWa r.e. AG, 2021; S. Schindele & deVries, 2020).

4.3 Potenzialanalyse

Aktuell werden in Deutschland rund 25.500 Hektar Beerenobst angebaut (davon Erdbeeren 18.500 Hektar und Strauchbeeren 7.000 Hektar). Die meisten Betriebe mit Strauchbeerenanbau befinden sich in Baden-Württemberg. Der Himbeerenanbau ist von der veränderten Anbaustruktur besonders stark betroffen. Der Anteil des geschützten Himbeerenbaus an dessen Gesamtfläche ist von 9 Prozent in 2012 auf 27 Prozent in 2017 gestiegen. Eine Ertragssteigerung von 3,6 t/ha auf rund 12 t/ha spielt hier die entscheidende Rolle (Garming et al., 2018).

Argumente die im Kapitel 3.3 die hohe Wirtschaftlichkeit von Agri-PV im Kernobst begründen, treffen auch auf den Beerenbau zu. Bei Beerenobst führen zudem gesicherte Lieferungen, vor allem außerhalb der Erntespitzen, zu deutlich höheren Erlösen und erlauben damit die Finanzierung einer Überdachung.

4.4 Standort Heuchlingen

4.4.1 Forschungskonzept und Innovationsgrad

Ein Schwerpunkt der Versuchstätigkeit des OVG Heuchlingen ist der Anbau von Beerenobst. In diesem Forschungsbereich liegen an der LVWO Weinsberg jahrzehntelange Erfahrungen vor. Im Rahmen der technischen Entwicklung des Beerenanbaus hin zum geschützten Anbau hat auch die Zahl an Überdachungskonstruktionen / Folienhäusern auf dem OVG Heuchlingen stark zugenommen (siehe Google maps). Im Gegensatz zu Hagelnetzkonstruktionen oder Kirschenüberdachungen bleiben Folienhäuser analog zu Gewächshäusern aber meist ganzjährig geschlossen bzw. überdacht. Insofern kann im intensiven Beerenanbau nicht von »Flächenverlust« durch eine Agri-PV-Anlage gesprochen, da die Überdachung für die Kultur ja bereits vorhanden und nicht neu ist.

Im Projekt wird der Einfluss von Agri-PV Anlagen auf die Kulturführung von Strauchbeeren (Him-, Heidel- und Johannisbeere) und Erdbeeren im Substrat erörtert, um ideale Kulturverfahren für den Beerenanbau unter Agri-PV-Überdachungen (Verlängerung des jahreszeitlich bedingten Beerenanbaus durch energieneutrale Beheizung oder Ertragssteigerung durch künstliche Beleuchtung) erarbeiten zu können. Im Zuge dessen werden verschiedene Beerenarten, sowie Substrate (Fokus auf torffreie bzw. stark torfreduzierte Substrate) unter den besonderen Bedingungen der Agri-PV Anlage getestet. Die Möglichkeit geschlossene Kreisläufe (Wasser und Nährstoffe) in überdachten Produktionssystemen zu etablieren soll untersucht werden, dafür müssen explizit die Synergieeffekte zwischen Agri-PV und der Wasseraufbereitung (Osmoseanlage) betrachtet werden. Ob die Wasserqualität im Beerenanbau durch Nutzung der Agri-PV-Dachflächen zur Wassergewinnung optimiert werden kann, muss geprüft werden. Durch eine Kombination der Agri-PV-Anlage (2.000 m² Fläche) mit dem Energiemanagement des OVG Heuchlingen (neuer 5.000 Liter Tiefkältespeicher für 400 Tonnen Kühllagerung für Obst, intelligentes Energiemanagementsystem für Tag-Nacht-Ausgleich, zwei Stromtankstellen für Betriebsfahrzeuge, E-Zugfahrzeug in Beschaffung) soll langfristig eine Strategie entwickelt werden mit dem Ziel eine »Energie Neutralität« zu erreichen und damit einen Beitrag zum Klimaschutz zu leisten.

Die Agri-PV-Anlage auf dem OVG Heuchlingen ist in Gebäudenähe geplant, um aufwendige Erschließungskosten zu vermeiden (Fig. 13). Zudem ist sie damit im unmittelbaren Bereich des Publikums- und Einkaufsbereichs, um die Vorgehensweise auch den Hofkunden und Besuchern zu demonstrieren. Die Anlage soll nicht nur der Stromerzeugung dienen, sondern in erster Linie den fortgeschrittenen Beerenanbau demonstrieren. Hierzu gehören der Anbau in einem geschlossenen Nährstoffkreislaufsystem und ggf. der Einsatz von Kunstlicht/Beheizung, um Übermengen an Strom sinnvoll zu verbrauchen. Die ältesten Beerenüberdachungen auf dem OVG Heuchlingen sind mittlerweile fast 30 Jahre alt. Es wird davon ausgegangen, dass auch Agri-PV-Anlagen über Beeren diese Standzeit erreichen und insofern von Nachhaltigkeit gesprochen werden kann.

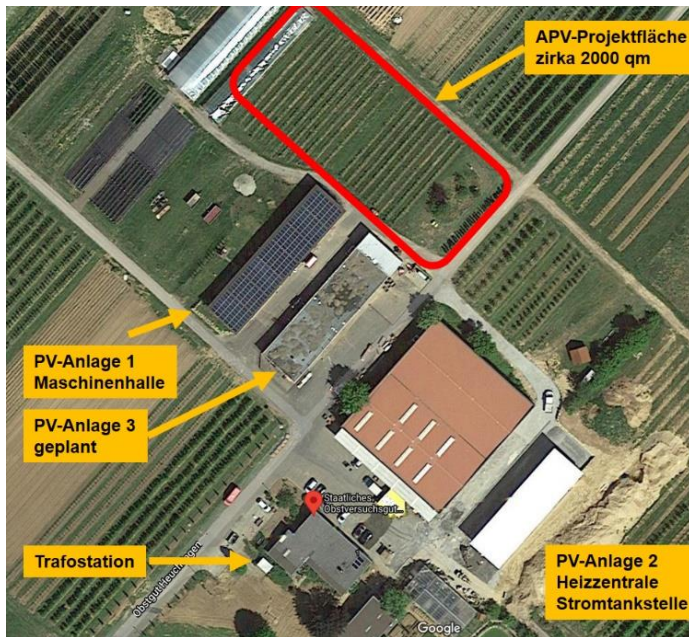


Fig. 13 voraussichtliche Lage der Agri-PV Fläche (rot) in Heuchlingen.

4.4.2 Machbarkeit

4.4.2.1 Umsetzungsvorschlag

Die Arbeitspakete sind im Anhang A in Tabelle A5 mit entsprechender zeitlicher Umsetzungsmöglichkeiten gelistet. Der Baubeginn könnte Anfang 2022 starten.

4.4.2.2 Technische Machbarkeit

Am Standort gibt es bereits einen konkreten Konstruktionsvorschlag von MKG Göbel (Fig. 14). Der Abstand zwischen den nach Ost-West ausgerichteten Modultischen soll nach erster Planung 1,3 Meter betragen. Die Module werden 12° geneigt sein und entsprechend der Flächenausrichtung einen Azimut Winkel von 312,57° haben. Für eine optimale Bewirtschaftung und gute Lichtverhältnisse der darunterliegenden Fläche ist eine Modulhöhe von 2,8 Metern und ein Transmissionsgrad von 51,8 Prozent geplant. An den Seiten sollen Fliegennetze angebracht werden. Regenrinnen zwischen den Modulen sorgen dafür, dass das Niederschlagswasser kontrolliert abgeführt und unter Umständen zur Bewässerung verwendet werden kann.

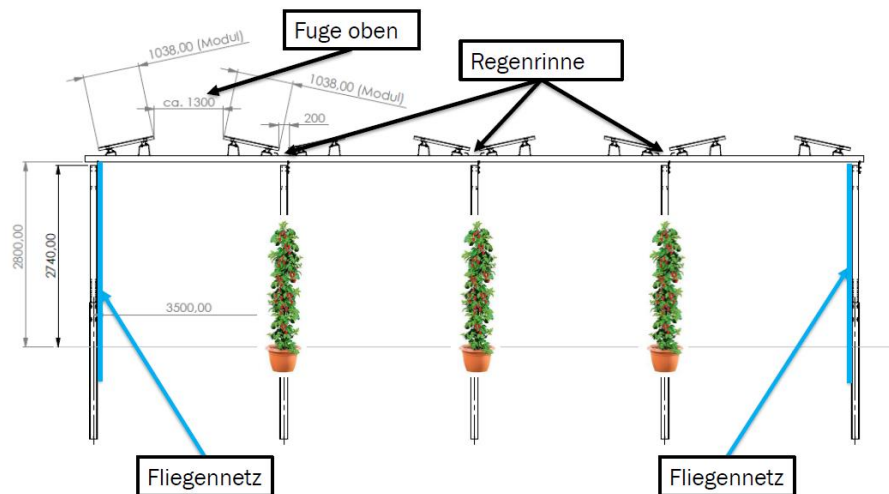


Fig. 14 Skizze des ersten Agri-PV-Entwurfs (Quelle: MKG Göbel).

Die exakte finale Auslegung kann von dem bisherigen Vorschlag abweichen, dieser wurde jedoch konkret vor Ort abgestimmt und bereits illustriert (Fig. 15).



Fig. 15 Illustration, wie die Anlage am Standort Heuchlingen aussehen könnte (Quelle: MKG Göbel).

4.4.2.3 Wirtschaftliche Machbarkeit

Nach der vorläufigen Berechnung wäre das Projekt mit der der Budgetierung wie in Tabelle 14 dargestellt durchführbar. Der Förderbedarf von knapp geschätzten 465.867 € entspräche einer Förderquote von 75,5 Prozent. Die Projektdauer ist auf drei Jahre (Oktober 2021 bis September 2024) ausgelegt.

Tabelle 14 Vorläufige Kostenkalkulation am Standort

	Kosten in € / Jahr (brutto)			
	2021	2022	2023	2024
Personalkosten*	15.000	60.000	60.000	45.000
Reisekosten	500	500	500	500
Material und Sachleistungen	2.778	8.333	8.333	5.556
Unteraufträge		30.000		
Agri-PV-Anlage	100.000	280.000		
Summe	118.278	378.833	68.833	51.056
Gesamt 617.000 €				
Förderbedarf 465.867 €				

* Technikerstelle E7: Betreuung der Beerenkulturen und Versuchsanstellungen

4.4.2.4 Risikobewertung

Der Kontakt zu Vermögen und Bau wurde bereits hergestellt. Die Nutzungsanforderung wurde schriftlich vorbereitet, es steht lediglich die Finanzierungszusage seitens MLR/UM aus. In einem darauffolgenden Schritt kann die Anfrage eingereicht werden, die mündlich schon positiv beschieden wurde. Im September können die Gespräche mit der örtlichen Baubehörde beginnen. Hier werden keine Komplikationen erwartet, da schon viele Vorhaben gemeinsam realisiert wurden, beispielsweise die Neubauten etlicher Maschinenhallen oder ein 25.000 m³ Bewässerungsteich.

Die geplante OPV-Anlage ist nach aktuellem Stand mit deutlich mehr Risiken behaftet, da die Praxistauglichkeit solcher Anlagen noch nicht ausreichend nachgewiesen werden konnte. Hohe Investitionskosten machen das Projekt zudem abhängig von externen Investoren, sodass es bisher weder in der technischen noch in der wirtschaftlichen Machbarkeit berücksichtigt wurde.

4.5 Standort Waldkirch – Praxisanlage

Zur Konzeptionierung der geplanten Umsetzung der Agri-PV-Anlage arbeitet der Betrieb mit der BayWa r.e. zusammen. Die bisherige Machbarkeitsstudie beschränkt sich auf die Standortsuche.

In Fig. 16 ist der ursprünglich geplante Standort für die Agri-PV Anlage neben einem Umspannwerk dargestellt. In einem koordinierenden Gespräch mit dem Regionalverband Südlicher-Oberrhein (RVSO) stellte sich jedoch heraus, dass die Fläche Teil einer Grünzäsur ist.

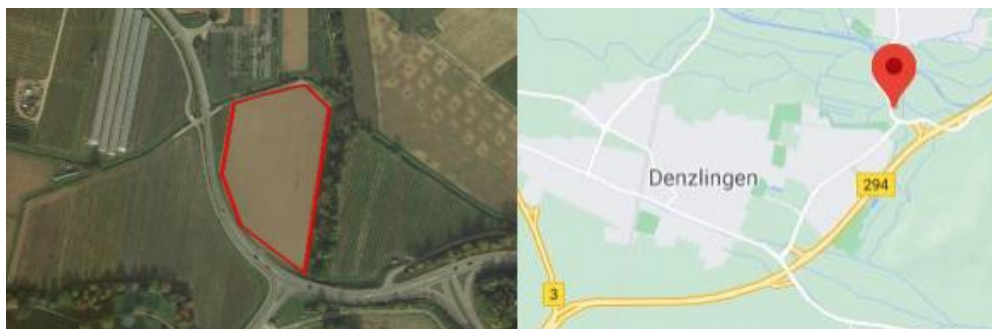


Fig. 16 Evaluierter Standort für die Agri-PV Anlage beim Obsthof Schwehr.

Da dieses raumplanerische Instrument zur Freiraumsicherung vorgesehen ist sind keine raumbedeutsame Veränderung zulässig. Daher mussten alternative Flächen geprüft werden, die in Fig. 17 dargestellt sind. Die Fläche nördlich der Bahntrasse ragt in einen regionalen Grünzug. Dieser Teil der Fläche könnte jedoch als Referenzfläche für die Agri-PV Anlage dienen. Die anderen Flächen und Flächenteile sind nach Auskunft des RVSO unbedenklich. Da die Verfügbarkeit durch den Eigentümer der Fläche westlich des Hofgeländes nicht gesichert ist, sind die gekennzeichneten Flächen zu bevorzugen. Ein weiterer Vorteil der Flächen ist die Hofnähe, wodurch Kosten durch den Netzanschluss im Vergleich geringer ausfallen als auf weiter entfernten Flächen.



Fig. 17 Ausweichflächen für die Agri-PV Anlage am Standort Schwehr in Waldkirch.

Ein Gespräch über einen Netzanschluss und Stromabnahme mit den Stadtwerken Waldkirch fand am 11.05.2021 statt. Grundlegendes Interesse den Strom der geplanten Agri-PV Anlage abzunehmen wurde ausgesprochen. Da noch kein technisches Konzept und Leistungsbemessung vorlag, wurde auch auf Nachfrage keine Preisindikation für einen möglichen Abnahmepreis gegeben. Der Netzanschluss fällt in den Zuständigkeitsbereich der Stadtwerke Emmendingen.

5 Teilprojekt Steinobst

5.1 Ziele

Die Produktion von qualitativ hochwertigem Steinobst, insbesondere der Kirschen, bedarf eines Regenschutzes besonders zum Zeitpunkt kurz vor der Ernte, um das Aufplatzen der Früchte und einhergehende Fäulnis zu verhindern. Aufgrund des Anstiegs der Temperaturen und der Sonneneinstrahlung werden immer häufiger Hitzeschäden bei den Früchten beobachtet. Im Kirschbau ist ein weiterer Grund für den Trend zum geschützten Anbau das vermehrte Auftreten der Kirschessigfliege. Ziel des Teilprojekts Steinobst ist daher, diesen und weiteren Herausforderungen durch die Integration von PV im Kirsch- und Zwetschenanbau zu begegnen, und die künftig vermehrt notwendigen Schutzfunktionen zu übernehmen. Das Teilprojekt besteht aus zwei Praxisanlagen in Senglingen (Kapitel 5.4) und in Nußbach (Kapitel 5.5). Der Standort Senglingen wird vom Obsthof Vollmer bewirtschaftet. Der Landwirt plant neben Apfel und Beerenobst verschiedene Zwetschgensorten unter Agri-PV aufzupflanzen. Im Praxisbetrieb Obsthof Vollmer, der gleichzeitig Industriepartner am eigenen Standort ist, sollen durch die Unterstützung des LTZ Augustenberg pflanzenbauliche und pflanzengesundheitliche Daten sowie Daten zur Fruchtqualität erhoben und bewertet werden. Zum zweiten Steinobstbetrieb liegen der Zeit nur wenige Informationen vor.

5.1.1 Beschreibung & Ziele aller Projektpartner

5.1.1.1 Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ Augustenberg)

Siehe Kapitel 3.1.2.3.

5.1.1.2 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)

Siehe Kapitel 3.1.2.6.

5.1.1.3 Obsthof Vollmer/Intech GmbH & CoKG

Der Obsthof Vollmer ist ein Nebenerwerbsbetrieb mit Direktvermarktung für Obst- und Weinbau mit ca. fünf Hektar Kern-, Steinobst sowie Kiwianbau und Weinbau. Der Eigentümer des Obsthofes Vollmer ist zugleich auch Gründer der Firmen Ingenieurbüro Dr. Vollmer und Intech GmbH & CoKG (Partnerfirma).

Der Obstbaubetrieb Vollmer plant die Errichtung einer Anlage mit Kern- und Steinobst, die mit Agri-PV versehen werden soll. Dabei sollen die von der Firma Intech GmbH & CoKG im Jahr 2012 entwickelten Solartracker (gefördert vom Land BW) Anwendung finden. Der Betriebsleiter des Obsthofes Vollmer kann auf eine 40-jährige Erfahrung im Obstbau zurückblicken. Aufgrund einer technisch-wissenschaftlichen Ausbildung, sowie einer über 20-jährigen Erfahrung im PV-Bereich, inklusive Freilandanlagen kann von einer erfolgreichen Projektumsetzung ausgegangen werden.

5.1.1.4 Andreas Blaser

Im Jahr 1990 gründete Andreas Blaser einen Obstanbaubetrieb in Meckenbeuren-Senglingen. Der Anbau wurde stetig erweitert mit dem primären Fokus auf der Apfel- und Erdbeerproduktion. Inzwischen bewirtschaftet Andreas Blaser knapp 200 Hektar am Bodensee. Die geernteten Produkte werden direkt an den Großhandel vermarktet. Inzwischen verkaufen zahlreiche Erzeugerbetriebe aus der Bodenseeregion und ganz Deutschland ihre Produkte an die Blaser Obst GmbH. Die Blaser Obst GmbH beliefert an nahezu 365 Tagen im Jahr ihre Kunden mit frischem Obst aus verschiedensten Ländern und Regionen. Die Auswahl der Produzenten wird jährlich nach verschiedenen Kriterien durch eine Lieferantenbewertung neu überprüft.

5.2 Stand der Wissenschaft und Technik, bisherige Arbeiten

Zu Zwetschgen gibt es keine bisherigen Arbeiten zum Thema Agri-PV. Sortenvorschläge wurden seitens des LTZ Augustenberg gemacht und die Entscheidung über auszuwählenden drei Sorten fällt der Betriebsleiter. Am LTZ Augustenberg liegen umfangreiche Erfahrungen zur Sortentestung in Zwetschgen vor. Schwerpunkte waren dabei z. B. Krankheitsanfälligkeit, Reifezeit, Fruchtfall, Ertrag und Qualität (Wuchsform, Steinbruch, Zuckergehalt, Größe, Beduftung).

5.3 Potentialanalyse

Die Anbauflächen von Pflaumen und Zwetschen haben zwischen 2007 und 2012 abgenommen und sind seitdem auf fast gleichem Niveau stabil geblieben. 2017 betrug die Anbaufläche von Pflaumen und Zwetschen etwa 4.200 Hektar, was ca. fünf Prozent der Obstanbaufläche entspricht. Im Schwarzwald gilt jedoch der Steinobstanbau (Kirschen, Pflaumen, Zwetschen) und die Weiterverarbeitung in Kleinbrennereien als regionales Kulturgut. Die Abnahme der Anbaufläche lässt sich mit den niedrigen Preisen pro Kilogramm begründen. Ggf. wird die Flexibilität im Nachbau größer, wenn man bei Zwetschen keine großvolumige Tellerkrone hat, sondern eine schmalere Anbauform (z. B. Ufo), die vergleichbar mit den schmalen Apfelbäumen ist. Die Anbauflächen von Sauerkirschen haben ebenfalls deutlich abgenommen, während die Süßkirschenfläche wieder leicht ansteigt. Nach Äpfeln belegen diese die größten Baumobstflächen (> 6.000 Hektar) (Garming et al., 2018).

5.4 Standort Senglingen – Praxisanlage

Da der Anlagenstandort direkt an die Hoffläche angrenzt äußerte der RVSO im Gespräch mit dem Fraunhofer ISE keine raumplanerischen Bedenken, obwohl sich der Standort in einem regionalen Grünzug befindet. Das Gebiet liegt im Landschaftsschutzgebiet (LSG) Eisrandformen zwischen Rebholz und Knellesberg, Nr.4.35.038. Um naturschutzrechtliche Hemmnisse zu identifizieren fand ein Termin vom Fraunhofer ISE mit Herrn Pflug vom Umweltschutzamt des LRA Friedrichshafen statt. Im Zuge eines Forschungsprojektes wurden unter Vorbehalt einer fehlenden Ortsbegehung keine Bedenken geäußert. Auch Hagelschutznetze sind in LSGs möglich. Außerhalb von Forschungsprojekten ist eine Umsetzung jedoch schwer möglich sofern Agri-PV Anlagen nicht in die Praktiken der ordnungsgemäßen Landwirtschaft (wie Hagelschutznetze) im Sinne des Naturschutzgesetzes aufgenommen werden. Zudem müssten Tatbestandsvoraussetzungen für Erlaubnisbefreiungen definiert werden.



Fig. 18 Standortvorschlag in Senglingen.

5.5 Standort Nußbach – Praxisanlage

5.5.1 Forschungskonzept und Innovationsgrad

Ziel des Obsthofes Vollmer ist der Erhalt des Obstbaubetriebes durch eine wirtschaftliche Absicherung sowie durch eine Steigerung der Fruchtqualität durch Teilbeschattung. Es sollen Synergien im Aufbau der Spaliere, durch die Erzeugung von erneuerbaren Energien für Bewässerungstechnik sowie Ladeinfrastruktur für batteriebetriebene Zugmaschinen auf dem Feld erreicht werden. Der Standort in Oberkirch Nußbach in der Ortenau/Mittelbaden liegt inmitten eines bekannten Obst- und Beerenanbaugebietes in Deutschland. Die Region ist sehr kleinräumig mit den verschiedensten obstbaulichen Kulturen strukturiert. Für die Agri-PV-Anlage sind die Kulturen Apfel (fünf Sorten vorgesehen), Zwetschgen (drei Sorten vorgesehen) sowie Beerenobst (z. B. Heidel- und Himbeeren) auf insgesamt 1,5 Hektar vorgesehen. Der Obsthof Vollmer ist Mitglied bei der REO/OGM (Obstgroßmarkt Mittelbaden). Die Abgrenzung zu den anderen Standorten erfolgt durch die Kombination der Kulturen (Kern-, Stein- sowie Beerenobst) sowie der vorgesehenen Technik der Firma Intech GmbH & CoKG im eigenen Praxisbetrieb. Die pflanzenbaulichen und pflanzengesundheitlichen Untersuchungen werden vom LTZ Augustenberg durchgeführt. Die zu erhebenden Daten entsprechen denen am Augustenberg mit entsprechender Anpassung an die ausgewählten Sorten und Kulturen. Mit der Eigenstromproduktion sollen Ladesäulen für elektrische betriebene Fahrzeuge betrieben werden. Des Weiteren betreibt der Obsthof Vollmer auch ein Apfelmülllager, dessen Kältemaschine seit über 10 Jahren mit Photovoltaikstrom betrieben wird. Die neue Agri-PV Anlage soll die Energie für die Bewässerungsanlage liefern.

Die von der Fa. Intech entwickelte Trackingsteuerung wird gemäß der Schattenberechnung des Fraunhofer ISE und in Zusammenarbeit mit dem LTZ Augustenberg, Sachgebiet Pflanzenschutz im Obstbau, entsprechend den Anforderungen für den Obstbau programmtechnisch weiterentwickelt. Sämtliche elektrische Daten, sowie der Neigungswinkel, Einstrahlung und Bodenfeuchte werden erfasst. Die Daten stehen auch dem LTZ Augustenberg zur Verfügung. Bei dem Betrieb der Anlage soll ebenfalls untersucht werden, in welchen Intervallen eine Modulreinigung notwendig ist. Durch die Spritzbrühe aus Pflanzenschutzmaßnahmen sind Reinigungsmaßnahmen zu erwarten. Bei den Reihentrackern kann während Regenschauer durch Schrägstellen der Module der natürliche Abwascheffekt zusätzlich erprobt werden. Grundsätzlich wird die Anlage so aufgebaut, dass mit Robotertechnik gereinigt werden kann. Da die Fa. Intech seit vielen Jahren Erfahrung im Bereich Putzroboter für PV-Anlagen hat, ist die Intech Agri-PV Anlage so konstruiert, dass eine ferngesteuerte automatische Reinigung möglich ist.

Daher fallen bei dieser Anlage die laufenden Kosten für die Modulreinigung deutlich geringer aus als für alle Vergleichsanlagen.

5.5.2 Machbarkeit

Die Firma Intech GmbH & CoKG verfügt über eine Eigenentwicklung Solartracking für Agri-PV als bewegliche Anordnung der Solarmodule (Einstrahlwinkel), sowie als bodennahe Agri-PV in Spalierbauweise. Als Industriepartner wird die Fa. Intech die Solaranlage schlüsselfertig erstellen. Die Fa. Intech hat das Interesse, den selbst entwickelten Reihentracker zur Anwendung zu bringen und wird dieses Projekt mit 170.000 € bezuschussen. Da bei der Erschließung eine Trafostation gebaut und an das Versorgungsnetz angeschlossen werden muss, wird die Agri-PV Anlage in einer Größe von 700 kWp gebaut. Dabei werden ca. 50 Prozent der PV-Anlage als Reihentracker (flexible Modulneigung) und 50 Prozent starr errichtet. Das Grundstück hat eine Südwest-Nordost Ausrichtung. Daher ist von der Reihentrackeranlage eine deutliche Produktivitätssteigerung zu erwarten. Allerdings steht diese Produktivitätssteigerung in der Relation von 60 Prozent Mehrkosten für das Trackingsystem, bzw. 20 Prozent Mehrkosten bezogen auf die PV-Gesamtanlage.

Erste Rammversuche wurden erfolgreich abgeschlossen. Die Unterkonstruktion aus verzinktem Vierkanrohr wird für die bewegliche Trackingvariante und für die feststehende Variante weiterentwickelt. Wichtige Parameter sind die Wartungsfreiheit der Lager und die Möglichkeit der automatischen Reinigung durch Putzroboter. Auf Grund der CO₂- und Entsorgungsproblematik, sind keine Fundamente aus Beton vorgesehen. Bisher wurden die Tracker der Fa. Intech über elektrisch betriebene lineare Stellmotore bewegt. Aufgrund von Verschmutzungsproblemen sind die Linearantriebe alle vier Jahre einer Reinigung zu unterziehen, welche den Ausbau und die Zerlegung erfordern. Daher wird die neue Trackergeneration mit einem hydraulischen Antrieb versehen. Die Bauvoranfrage wurde formlos gestellt. Das örtliche Bauamt wartet auf Weisung durch das Regierungspräsidium. Mit dem Netzbetreiber Stadtwerke Oberkirch wurde die Errichtung der Trafostation abgestimmt. Die Kabel Zuwegung erfolgt in der Zufahrtsstraße, die Trafostation wird am Grundstücksende platziert. Die Anlage auf einer Fläche von ca. 1,5 Hektar wird in zwei Bauabschnitten errichtet. In einem ersten Abschnitt werden zehn Reihen à 150 Meter Länge mit beweglichen Reihentrackern errichtet (September bis November 2021). In diesem Spätjahr soll auch die Pflanzung der Bäume unter den Reihentrackern erfolgen. Bei dem zweiten System handelt es sich um ein statisches System mit teiltransparenten Modulen. Abgesehen von möglicherweise langen Modullieferzeiten werden keine realisierungskritischen technischen Probleme erwartet.

5.5.2.1 Technische Machbarkeit

Das Grundstück ist vorbereitet. Die Stadtwerke Oberkirch möchten den Agri-PV Strom als grünen Strom lokal vermarkten und haben einer Stromabnahme und dem Netzananschluss zugesagt. Das Steinobst wird über die OGM (vier Kilometer Entfernung), das Kernobst am Hof (Direktvermarktung) und über das Schulobstprogramm des Landes BW vermarktet. Das Intech Reihentrackersystem eignet sich für alle Spalieranwendungen im Kern- und Steinobst, sowie im Weinbau. Durch die Möglichkeit die Module nahezu senkrecht zu stellen sind grundsätzlich alle ackerbaulichen Anwendungen möglich. Im Gegensatz zu fix-gestellten senkrechten Schilden bietet die Variabilität des Aufstellwinkels einen höheren Ertrag, bessere Schattenwurfsteuerung und die Möglichkeit einer Waagrechtlage bei Sturmwarnung, was eine deutlich geringere Belastung für die Module und der Konstruktion zur Folge hat. Die Hochspannungsleitung liegt in einer Entfernung von ca. 140 Metern. Mit dem Netzbetreiber Stadtwerke Oberkirch wurde

die Einschleifung des Netzanschlusses mit eigener Trafostation vereinbart. Die Kosten werden auf ca. 90.000 € geschätzt.

Teilprojekt Steinobst

5.5.2.2

Wirtschaftliche Machbarkeit

Die gesamten Projektkosten betragen ca. 950.000 €. Ein Pauschalbetrag von 65.000 € ist für die wissenschaftliche Betreuung durch den für das Projekt eingestellten Sachbearbeiter eingeplant. Das LTZ Augustenberg begleitet das Teilprojekt wissenschaftlich. Von dem Gesamtbetrag werden 170.000 € vom Industriepartner Intech übernommen. Da das Projekt auf einer Eigenfläche des Obsthofes Vollmer errichtet wird und die Kulturen eine Standzeit von ca. 25 Jahre haben akzeptiert der Projektpartner Herr Vollmer eine Amortisationszeit von 25 Jahren. Damit verbleibt ein Zuschussbedarf von ca. 200.000 €. Dieses Zahlenwerk geht davon aus, dass für dieses Projekt die MwSt. geltend gemacht werden kann. Eine Marge aus dem Stromverkauf liegt nach der derzeitigen Berechnung nicht vor. Der Stromverkauf geht an die Stadtwerke Oberkirch, welche sich zukünftig auf den Vertrieb von regenerativem Strom fokussieren möchte. Der derzeit diskutierte Strompreis liegt bei 6 - 7 ct/kWh, allerdings liegt noch kein schriftliches Angebot vor.

5.5.2.3

Risikobewertung

Das Risiko ist keine Genehmigung für die Agri-PV-Anlage zu erhalten. Frühere Versuche in dieser Richtung wurden von der Baubehörde abgelehnt. Im jetzigen Fall berät sich die Baubehörde, nachdem vor einem Jahr eine Voranfrage gestartet wurde, mit dem Regierungspräsidium Freiburg. Die Vorabstimmung ist abgeschlossen mit der geplanten Änderung des Flächennutzungsplanes für die Anlagenstandorte als »Sondergebiet Freiflächenanlage«. Eine Detailprüfung wird im förmlichen Prozess dennoch erfolgen. Von Seiten des zuständigen Regionalverbandes RVSO gab es auf Anfrage aber keine raumordnerischen Bedenken.

6 Teilprojekt Acker- und Gemüsebau

Im Rahmen des Projektes APV-RESOLA (Agri-Photovoltaik-Ressourceneffiziente Landnutzung, Förderung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung) wurde 2016 die bisher größte deutsche Agri-PV-Pilotanlage in Baden-Württemberg errichtet. Hier konnte gezeigt werden, dass durch eine Kombination aus Ackerbau und Energiegewinnung die Flächennutzungseffizienz gesteigert werden kann (Trommsdorff et al., 2021). Zentral bleibt aber die Fragestellung, ob es durch Beschattung und mikroklimatischen Veränderungen in der Agri-PV-Anlage zu einem Ertragsrückgang der angebauten Kulturen kommt oder ob unter bestimmten Bedingungen sogar höhere Erträge bzw. bessere Produktqualitäten erzeugt werden können. Derzeit sind dazu nur in sehr begrenztem Umfang empirische Forschungsarbeiten verfügbar. Um diese Daten zu erheben sollen im Rahmen des Teilprojektes Ackerbau drei Forschungs- und Pilotanlagen mit aufeinander abgestimmten Fruchtfolgen errichtet werden, außerdem soll die bereits bestehende Anlage der Hofgemeinschaft Heggelbach (Projekts APV-RESOLA) nachgerüstet und ebenfalls beforcht werden. Auf einem der Standorte der Versuchstationen der Universität Hohenheim, dem »Ihinger Hof« (siehe Kapitel 6.5), soll der Einfluss von zwei baulich unterschiedlichen Agri-PV-Systemen auf Pflanzen untersucht werden. Hierbei wird voraussichtlich eine Anlage der Firma TubeSolar installiert, die mit neuartigen PV-Röhren für eine gleichmäßige Regen- und Lichtverteilung sorgen soll. Eine weitere Anlage soll durch die Firma Next2Sun realisiert werden, bei der vertikal aufgeständerte Solarmodule zum Einsatz kommen. Die Lichtverteilung wird in diesem System vermutlich deutlich heterogener ausfallen als bei Anlagen der Firma TubeSolar. Die Untersuchung dieser Unterschiede in der Beschattung und den Auswirkungen auf weitere biotische und abiotische Faktoren stellen eine wichtige Komponente des Projektes dar, insbesondere, weil vertikal aufgeständerte Systeme bereits auf Grünland genutzt werden und eine Ausweitung dieses Agri-PV-Systems auf Ackerbaustandorte geplant ist. Insgesamt wird sich die Leistung der am Ihinger Hof realisierten Anlagen auf ca. 500 kWp belaufen. An den Praxisstandorten »Lindenbrunnenhof« (siehe Kapitel 6.6) bei Forchheim am Kaiserstuhl und in der Anlage der Hofgemeinschaft Heggelbach (Kapitel 6.7) sollen die gleichen Kulturen wie unter der Forschungsanlage auf dem Ihinger Hof untersucht und agrarwissenschaftliche Messungen durchgeführt werden. Forschungsschwerpunkt am Lindenbrunnenhof würde nach aktuellem Planungsstand die Entwicklung eines mobilen Agri-PV-Systems mit nachgeführten Solarmodulen, die eine größere Flexibilität bei der Bedarfsanpassung (Strom oder landwirtschaftliche Erzeugnisse) gewährleisten können und somit ein weiteres, zukünftig praxisrelevantes Agri-PV-System darstellen. Die Heggelbacher Anlage wurde als Pilotanlage im Projekt APV-RESOLA durch Hilber-Solar, BayWa r.e. und dem Fraunhofer ISE konstruiert und installiert. Diese Anlage ist durch hoch aufgeständerte Module gekennzeichnet. Diese Bauweise resultierte in der Vergangenheit allerdings in einer Heterogenität der abiotischen Faktoren, insbesondere der Wasserverteilung, was zu einer Erosionsgefährdung in Teilen der überbauten Fläche geführt hat. Um weitere Forschungsarbeiten durchführen zu können, sollte daher die bestehende Anlage basierend auf den heutigen Erkenntnissen nachgerüstet werden.

6.1 Ziele

6.1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Die generelle Machbarkeit von PV und Ackerbau konnte im Rahmen des Projektes APV-RESOLA unter den Bedingungen des ökologischen Landbaus mit einem bestimmten

Anlagentyp (hochaufgeständerte bifaziale Module) gezeigt werden. Um nun die Realisierbarkeit von Agri-PV auch in der konventionellen Landwirtschaft zu demonstrieren und verschiedene Ansätze der Agri-PV-Technologie zu untersuchen, müssen weitere Forschungs- und Pilotanlagen entwickelt und errichtet werden. Erkenntnisse aus diesen Anlagen sind notwendig, um Agri-PV langfristig deutschlandweit in die Fläche bringen zu können. Außerdem benötigt die landwirtschaftlichen Praxis Informationen zum Einfluss der Anlagen auf Ertrag und Produktqualität. Diese Informationen liegen im Augenblick bedingt durch die ungenügende Datenlage noch nicht vor.

Ziel des Projektes ist es deshalb weitere Daten auf Ackerstandorten zu erheben, die zu einem besseren Verständnis der Interaktionen zwischen angebauten Kulturen und PV-Anlage führen können.

6.1.2

Beschreibung & Ziele aller Projektpartner

6.1.2.1

Universität Hohenheim und Standort der Versuchsstation »Ihringer Hof«

Die Universität Hohenheim ist im Bereich Agrarforschung eine der führenden Universitäten in Deutschland. Im Rahmen des Projektes APV-RESOLA war die Universität Hohenheim an der agrarwissenschaftlichen Analyse der ersten Agri-PV Pilotanlage in Baden-Württemberg beteiligt und kann hier auf bereits erlangte Erfahrungen und Erkenntnisse aufbauen. Zudem besitzt die Universität Hohenheim ein breites Netzwerk von Akteuren der Agri-PV-Branche und Kontakte zu internationalen Forschergruppen, die sich ebenfalls mit Agri-PV befassen. Die Universität ist fachlich mit zahlreichen Experten an den Fachgebieten (Fg.) Pflanzenökologie (320), Physik und Meteorologie (120a) und Biogeophysik (310d) optimal aufgestellt, um agrarwissenschaftlichen Analysen durchzuführen (Kontaktmöglichkeiten in Tabelle A 1). Der Ihringer Hof als Teil der Versuchsstation Agrarwissenschaft der Universität Hohenheim ist ein idealer Standort mit der benötigten versuchstechnischen Infrastruktur und kann auf jahrelange Erfahrungen im landwirtschaftlichen Versuchswesen zurückgreifen.

Fg. Pflanzenökologie (Prof. Dr. Andreas Schweiger, Prof. Dr. Petra Högy)

Das Fg. Pflanzenökologie beschäftigt sich mit der Reaktion von Pflanzen als Hauptakteure in Ökosystemen auf Umweltveränderungen, um die Widerstandsfähigkeit und somit die Leistungsfähigkeit der Ökosysteme abschätzen und vorhersagen zu können. Ziele der Forschungsaktivitäten sind die Vorhersagen zu zukünftigen Ökosystemveränderungen zu verbessern und darauf aufbauend Adaptionstrategien für eine nachhaltige Landnutzung zu entwickeln. In diesem Zusammenhang beteiligte sich das Team an großen DFG-Programmen wie FOR 1695 (Regionaler Klimawandel) und APV-RESOLA (Agri-PV) und untersuchte die Interaktionen zwischen Pflanzen und Umweltveränderungen auf der Skala einzelner Pflanzen, von Pflanzenbeständen und ganzer Ökosysteme. Das Team hat langjährige Erfahrungen auf dem Gebiet der Auswirkungen von Agri-PV-Systemen auf das Mikroklima, ökophysiologische Messungen auf unterschiedlichen Skalenebenen und der Abschätzung der Folgen für Ertrag und Ertragsqualität.

Fg. Physik und Meteorologie (Prof. Dr. Volker Wulfmeyer, Dr. Oliver Branch)

Das Fg. Physik und Meteorologie (IPM) nutzt eine Synergie aus Theorie, Modellsimulation und modernsten aktiven Fernerkundungsmethoden, um wichtige Fragen zum System Land-Atmosphäre zu beantworten. Um die räumliche Verteilung von atmosphärischem Wasserdampf, Temperatur, Aerosolen und Wolken mit bisher unerreichter Auflösung zu untersuchen, werden Lidar-/Radar-Fernerkundungsmethoden eingesetzt.

Diese können kombiniert werden, um vollständige Flussprofile der unteren Troposphäre abzuleiten. Das IPM führt außerdem Langzeitmessungen von oberflächennahen turbulenten Energie- und Feuchtigkeitsflüssen über Agrarlandschaften durch, um wichtige Daten für die Untersuchung von Boden-Pflanze-Atmosphäre-Prozessen über sich entwickelnde phänologische Phasen zu liefern. Das IPM ergänzt diese Messungen mit hochaufgelösten Modellsimulationen, z. B. Gitterauflösungen von fünf bis zehn Metern, um Land-Atmosphären-Wechselwirkungen in der Biosphäre zu untersuchen. Im Mittelpunkt dieser Simulationen stehen detaillierte Darstellungen der Eigenschaften und Prozesse von Pflanzen, Böden und urbanen Landoberflächen, insbesondere in Bezug auf die tageszeitliche, phänologische und saisonale Entwicklung. Diese Beobachtungs- und Simulationsansätze werden zur Modellverifizierung und Datenassimilation sowie zum Prozessverständnis und zur Entwicklung neuer mathematischer Modelle des Erdsystems kombiniert.

Fg. für Biogeophysik (Dr. Sebastian Gayler)

Die Forschung der Gruppe konzentriert sich auf biophysikalische Prozesse in terrestrischen Ökosystemen, welche die Wechselwirkungen zwischen Boden, Pflanze und Atmosphäre, den Kohlenstoff-Stickstoff-Kreislauf im Boden sowie die N₂O- und CH₄-Emissionen, den Verbleib und Transport von Umweltchemikalien, den Boden- und Grundwasserschutz und die Regionalisierung umfassen. Das Team war an großen DFG-Programmen wie GRK 1829 und FOR 1695 beteiligt, in denen Rückkopplungen im System Boden-Pflanze-Klima intensiv untersucht wurden. Die Gruppe hat langjährige Erfahrung in der Entwicklung und Anwendung von Boden-Pflanzen-Modellen auf verschiedenen Skalen. Mehrere Wachstumsmodelle für verschiedene Pflanzen- und Baumarten wurden innerhalb der Modellierungsplattform Expert-N implementiert und weiterentwickelt. Die Gruppe hat zu mehreren Studien des AgMIP (Agricultural Model Intercomparison and Improvement Project) Konsortiums beigetragen.

6.1.2.2

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)

Siehe Kapitel 3.1.2.6

6.1.2.3

Landwirtschaftliches Technologiezentrum (LTZ Augustenberg)

Das Referat 14 Ökologischer Landbau ist am LTZ Augustenberg fachlich für den ökologischen Landbau zuständig und ist zudem ein Teil des Kompetenzzentrums Ökologischer Landbau Baden-Württemberg (KÖLBW) mit Sitz in Emmendingen-Hochburg. Im Mittelpunkt der Arbeit des Referats stehen praxisrelevante Versuche zu aktuellen Fragestellungen des ökologischen Landbaus und der Wissenstransfer in Beratung und Praxis des ökologischen Landbaus. Das LTZ Augustenberg hat hierzu über Baden-Württemberg verteilt zentrale Versuchsfelder (vgl. Kapitel 3.1.2.3). Eines dieser Felder für Versuche im ökologischen Landbau liegt auf der Fläche des Lindenbrunnenhofes. Durch die räumliche Nähe des Versuchsvorhabens am Lindenbrunnenhof sowie eigener Versuchsflächen auf dem Lindenbrunnenhof kann eine Unterstützung bei der Konzeptionierung des Forschungsvorhabens sowie der praktischen Umsetzungen erfolgen. Ziel ist es, das Forschungsvorhaben im Sinne der Kernaufgaben des LTZ Augustenberg zur Begleitung und Weiterentwicklung von Produktionsverfahren zu unterstützen und eine sachgerechte agrarwissenschaftliche Begleitforschung sicherzustellen. Hierbei liegt auch ein Fokus auf die Sicherstellung und Prüfung der Relevanz des Vorhabens für die landwirtschaftliche Praxis und hierbei insbesondere für die ökologische Landwirtschaft. Am LTZ Augustenberg gibt es aktuell noch keine Vorarbeiten zum Thema Agri-PV. Das LTZ

Augustenberg hat im Projekt Agro-Wertholz (FNR) den Einfluss von Beschattung, welche auch in Agri-PV eine der Einflussgrößen ist, auf Qualität und Ertrag bei landwirtschaftlichen Kulturen untersucht. Herr Weselek, Mitarbeiter im Referat 14 des LTZ Augustenberg, hat in seiner Tätigkeit an der Universität Hohenheim die agrarwissenschaftlichen Versuche der Agri-PV-Anlage in Heggelbach über mehrere Jahre begleitet und ausgewertet. Hierzu sind bereits mehrere englischsprachige Fachpublikationen erschienen. Des Weiteren verfügt das LTZ Augustenberg über Fachexpertise im Ackerbau mit Schwerpunkt auf ökologischem Pflanzenbau und Kartoffeln sowie zusätzliche Expertise zu weiteren Themen wie Bewässerung, Pflanzenschutz und Agri-PV. Bei darüber hinaus bestehenden Fachfragen können weitere Fachreferate oder -abteilungen zur Beratung miteinbezogen werden.

6.1.2.4

TubeSolar AG und Schlaich Bergermann Partner (sbp)

TubeSolar ist ein Produzent von patentierten Photovoltaik-Röhren-Modulen für die Nutzung in Agri-PV-Anlagen. Grundlagen der angewandten Technik stammen von OSRAM®/LEDVANCE® und wurden im Zuge eines Spin-offs per abgeschlossenem Technologie- und Brain-Transfer in die TubeSolar AG eingebracht. Vorteile der Technologie ergeben sich dadurch, dass zum einen die OSRAM Fertigungstechnologie übernommen werden kann, und zum anderen, dass der Materialaufwand für die Fertigung gering ist. Dabei bieten die TubeSolar Module eine lückenlose Überspannung von großen Flächen, indem die Röhren zu 1m x 1m Modulen zusammengeführt und in Tragschienen zur finalen Modulgröße von ca. 2m x 1m montiert werden. Dieses Konzept erlaubt eine homogene Einstrahlungs- und Regenverteilung unter der Anlage, liefert diffuses Licht und ermöglicht durch Winddurchlässigkeit eine Leichtbauweise der Aufständering (entwickelt vom Ingenieurbüro sbp), sowie eine schnelle und einfache Montage.

6.1.2.5

Next2Sun GmbH

Die Firma Next2Sun GmbH wurde 2015 gegründet, um ein neuartiges vertikales Photovoltaik-Anlagenkonzept zu realisieren. Das Team verfügt über mehrjährige Erfahrungen als Projektentwickler und Anlagenbetreiber und agiert von Standorten in Berlin, Freiburg im Breisgau und Merzig an der Saar. Gemeinsam mit den Mutterunternehmen Ökostrom Saar GmbH und Solverde Bürgerkraftwerke Energiegenossenschaft eG wurde das Next2Sun-Anlagenkonzept bis zur Marktreife gebracht. Beide Unternehmen entwickeln und realisieren bereits seit vielen Jahren erfolgreich Projekte im Bereich Erneuerbare Energien. In der Next2Sun wird die Branchenerfahrung und das Know-how beider Gesellschaften gebündelt. Das vertikale bifaziale Next2Sun Freiflächensystem fügt der Energiewende ein neues Stromerzeugungsprofil hinzu. Durch die senkrechte Ost-West Ausrichtung können Lastspitzen in den Morgen und Abendstunden erreicht werden – antizyklisch zu den bestehenden Südanlagen. Dies ist zuträglich für die Netzstabilität und ermöglicht den Anschluss von Anlagen an bereits ausgelasteten Netzweigen und höhere Erlöse an der Strombörse. Variable Reihenzwischenräume von mindestens 8 Meter ermöglichen weiterhin vielfältige landwirtschaftliche Nutzungskonzepte. Zudem ermöglicht die vertikale Aufständering eine Einsparung von Baumaterial und ist demnach kostengünstiger als hochaufgeständerte Anlagen. Die Nutzung des Anlagenkonzepts als Agri-PV-Anlagen konnte schon an mehreren Standorten in Deutschland erfolgreich umgesetzt werden, eine wissenschaftliche Begleitung und Analyse in Deutschland wurde jedoch noch nicht durchgeführt.

6.1.2.6 Lindenbrunnenhof

Der Lindenbrunnenhof ist ein ökologisch bewirtschafteter Gemüsebau- und Ackerbaubetrieb in Forchheim am Kaiserstuhl, Familienbetrieb und seit 2011 Mitglied im Bio-land-Verband. Spezialisiert ist der Lindenbrunnenhof hauptsächlich auf den Anbau von Kartoffeln, die direkt vermarktet oder weiterverarbeitet werden. Florian Binder, Verantwortlicher für die Agri-PV am Lindenbrunnenhof, arbeitet seit Anfang 2021 am Staatlichen Weinbauinstitut Freiburg im Bereich der Agri-Photovoltaik und plant in dieser Funktion die Umsetzung von Anlagen an Standorten von landwirtschaftlichen Landesanstalten im Bereich des Sonderkulturanbaus in Baden-Württemberg. Er verfügt somit sowohl über das landwirtschaftliche Praxiswissen als auch über das notwendige Hintergrundwissen zur Planung und zu den Genehmigungsverfahren von Agri-PV-Anlagen. Für den Lindenbrunnenhof ist der Einsatz einer flexiblen, mobilen Agri-PV-Anlage geplant, die es ermöglicht, bedarfsgerecht die landwirtschaftliche oder die Stromproduktion zu optimieren. Ziele des Lindenbrunnenhofs sind dabei der Erhalt der wertvollen landwirtschaftlichen Nutzflächen und damit auch der Erhalt der wichtigen spezifischen Ökosysteme um den Kaiserstuhl, welche mit wirtschaftlich attraktiven herkömmlichen Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) und Wohnflächen konkurrieren. Weitere Ziele des Betriebsleiters sind neben der Selbstversorgung mit Strom eine klimaneutrale Produktion. In enger Zusammenarbeit mit der Gemeinde Forchheim wird auch die zukünftige Energieversorgung der Region berücksichtigt. Das Dachflächenpotenzial für die notwendige PV-Energieproduktion, um den Endenergieverbrauch zu einem hinreichenden Anteil in Zukunft zu decken, ist in Forchheim und Endingen nicht ausreichend (Barden et al., 2013). Die Kunden des Lindenbrunnenhofs wurden bereits über die Planungen des Betriebes zur Errichtung einer Agri-PV-Anlage informiert. Es zeigte sich, dass die Kunden Wert auf eine nachhaltige und regionale Produktion von Lebensmitteln und Energie legen und daher den Bau einer Agri-PV Anlage auf den Flächen des Lindenbrunnenhofs befürworten.

6.1.2.7 Hofgemeinschaft Heggelbach

Die Hofgemeinschaft Heggelbach besteht aus sechs Familien, die den Betrieb biologisch-dynamisch nach Richtlinien des Demeter-Verbands bewirtschaften. Zum Betrieb gehören 95 Hektar Ackerland und 60 Hektar Weideland, sowie 45 Milchkühe, 250 Mastschweine, eine Käserei, eine Verpackungs- und Bündlungshalle für Gemüse und Kartoffeln für Marktpartner in der Region sowie eine Verarbeitungsanlage für Rote Bete (Halbfertigware). Auf einer Fläche der Hofgemeinschaft wurde im Jahr 2016 im Rahmen des Projektes APV-RESOLA eine Agri-PV-Pilotanlage mit einer Größe von 0,3 Hektar und einer Leistung von 195 kWp installiert. Ziel der Hofgemeinschaft ist es, einen Großteil des produzierten Stroms auf dem Hof selbst zu verwenden beispielsweise über die Nutzung von elektrifizierten landwirtschaftlichen Geräten (z. B. Gabelstapler), E-Fahrzeugen, für die Käserei und für die Gemüseverarbeitung. Unter der Agri-PV-Anlage wurden während der Laufzeit des Projektes APV-RESOLA bereits Winterweizen, Knollensellerie, Kartoffeln und Klee gras angebaut und im Vergleich zu einer unbebauten Referenzfläche von der Universität Hohenheim untersucht. Erste Ergebnisse zeigten kultur- und jahresabhängige Unterschiede im Ertrag, mit zum Teil positiven Effekten der Anlage in trockenen und heißen Jahren. Die Bearbeitung der Flächen unter den Solarmodulen ist bereits gut in die Abläufe der Hofgemeinschaft integriert. Von den praktischen Erfahrungen des Leiters des Bereichs Ackerbau in Heggelbach, Florian Reyer, mit der Anlage würden alle weiteren Forschungsaktivitäten und Demonstrationsvorhaben zu Agri-PV profitieren.

Stand der Wissenschaft

Die Kombination aus Ackerbau und Energiegewinnung wird im Projekt APV-RESOLA seit 2016 mit dem Ziel die Machbarkeit einer solchen Anlage vor dem Hintergrund der Energieerzeugung, der Wirtschaftlichkeit, der Pflanzenproduktion, der sozialen Akzeptanz, sowie der Entwicklung des technischen Designs zu untersuchen, erprobt. In den ersten Jahren 2017 und 2018 wurden Klee gras, Winterweizen, Sellerie und Kartoffeln unter der Anlage und auf einem Referenzfeld neben der Anlage angebaut. Waren die Erträge im ersten Jahr noch zwischen 5 und 19 Prozent reduziert, fielen die Ertragsrückgänge im darauffolgenden trockenen und heißen Jahr 2018 niedriger aus, bzw. waren die Erträge sogar um bis zu zwölf Prozent erhöht. Die Unterschiede zwischen den Jahren führten auch zu Veränderung im Land Equivalent Ratio (LER), einem Konzept für die Bewertung doppelgenutzter Flächen. Liegt der Wert über eins, so ist eine Doppelnutzung der Fläche ertragreicher, als beide Nutzungsarten auf getrennten Flächen durchzuführen. In beiden Jahren, unabhängig von den klimatischen Bedingungen, lag der LER über eins: Im Jahr 2017 zwischen 1,56 und 1,70 und 2018 zwischen 1,67 und 1,87. Die Ergebnisse zeigen somit, dass sich Agri-PV besonders in trockenen und heißen Jahren positiv auf die landwirtschaftlichen Erträge auswirken kann (Trommsdorff et al. 2021). Eine gesteigerte Flächenproduktivität konnte nicht nur im Projekt APV-RESOLA festgestellt werden, sondern auch in Forschungsanlagen in Frankreich (Dupraz et al. 2011; Valle et al. 2017). Besonders in warmen Regionen und Anbaujahren mit überdurchschnittlich heißem und trockenem Klima zeigten sich positive Effekte der Agri-PV Anlagen auf den Ertrag, während es je nach Kultur unter kühleren Bedingungen zu Ertragsrückgängen kam. Da einzelne Ergebnisse nicht unbedingt auf andere Standorte übertragbar sind, sollten die Auswirkungen von Agri-PV Systemen auf landwirtschaftliche Erträge an verschiedenen Orten untersucht werden. Alle erhobenen Daten könnten dann im Rahmen von speziell entwickelten Modellen einen Beitrag leisten, Agri-PV-Systeme an verschiedenen Standorten planen und evaluieren zu können.

Eine der größten Forschungslücken bisher besteht im fehlenden Wissen zu den Veränderungen der abiotischen Faktoren in einem Agri-PV-System. Nicht nur die Sonneneinstrahlung wird durch die Beschattung reduziert, sondern auch Effekte auf z. B. Boden- und Lufttemperatur sind zu erwarten. Unter der Agri-PV-Anlage in Heggelbach war z. B. die Bodentemperatur im Jahr 2017 um 1,2 °C und im Jahr 2018 um 1,4 °C im Vergleich zum Referenzfeld reduziert (Weselek et al., 2021). Auch Marrou, Guillioni et al. (2013) beobachteten eine reduzierte Bodentemperatur unter einer Agri-PV Forschungsanlage in Frankreich. Des Weiteren konnten Veränderungen in der Bodenfeuchtigkeit unter der Anlage in Heggelbach festgestellt werden. Im Jahr 2017 war die Bodenfeuchtigkeit im Vergleich zur Referenzfläche um 1,9 Prozent höher, während sie 2018 um 3,1 Prozent reduziert war. Während die relative Luftfeuchtigkeit unter der Anlage in Heggelbach in beiden Jahren um 2,8 Prozent höher war, konnten Marrou, Guillioni et al. (2013) in ihrem Versuch in Frankreich keinen Unterschied in der Luftfeuchtigkeit zwischen der Anlage und dem Referenzfeld feststellen. Es zeigt sich also, dass die Auswirkungen von Agri-PV-Anlagen auf mikroklimatische Bedingungen je nach Anlagendesign und Standort variieren können. Auch die Heterogenität innerhalb einer Anlage wurde bisher noch nicht ausreichend untersucht (Weselek et al., 2019). Elamri et al. (2018) beobachteten eine heterogene Regenverteilung in einem Agri-PV System. Diese kann zu unterschiedlichen Bodenfeuchten innerhalb der Anlage führen (Hassanpour Adeg et al., 2018), welche wiederum ungleiches Pflanzenwachstum verursachen können, was die Abreife und damit die Ernte erschweren kann. Die Auswirkungen hetero-

gener Regenverteilung und daraus resultierender heterogener Bodenfeuchtigkeit unter Agri-PV Systemen und die Effekte auf das Pflanzenwachstum, den Ertrag und die Ertragsqualität wurden bis jetzt noch nicht untersucht. Außerdem ist unklar, welchen Einfluss unterschiedliche Bauweisen der Agri-PV-Anlagen (hoch aufgeständert, mit Tracker, ohne Tracker, vertikale Aufständering, usw.) auf die Heterogenität der abiotischen Faktoren haben. So scheinen z. B. Systeme mit PV-Röhren eine vielversprechende Lösung zu sein, um für eine gleichmäßigere Regenverteilung zu sorgen, allerdings wurde dies bisher noch nicht überprüft.

Stand der Technik

Vorkenntnisse bzw. praktische Erfahrungen zu den vier zu untersuchenden Systemen sind unterschiedlich ausgeprägt, da sich einzelne Systeme derzeit noch in Entwicklung befinden, andere hingegen bereits in größerem Umfang auf landwirtschaftlich genutzten Flächen installiert wurden.

Mit hochaufgeständerten Systemen haben diverse Forschungsprojekte Erfahrungen gesammelt. In Kombination mit Ackerbau wurde in Deutschland im Jahr 2016 im Rahmen des Projektes APV-RESOLA auf der Hofgemeinschaft Heggelbach eine solche Anlage errichtet. Da diese Anlage Teil des vorliegenden Forschungsprojekts ist, werden Details zur Konzeptionierung und zum Aufbau im Kapitel 6.7.1 beschrieben. Als ein Nachteil des Systems hat sich die ungleiche Regenverteilung, die durch die Abtropfkante der Modultische entsteht, herausgestellt. Hier könnten Anlagen der Firma TubeSolar - ebenfalls aufgeständerte Systeme - einen Vorteil bieten. Diese zeichnen sich durch ihre patentgeschützte Röhrentechnologie aus, bei der gerollte PV-Dünnschichtfolien in ein Glasrohr eingesetzt werden (Fig. 19). Das Design in Form von Röhrenmodulen könnte für eine homogenere Licht- und Regenwasserverteilung sorgen. Das Konzept ist ideal für Agri-PV geeignet, da eine Kombination mit diversen Kulturen möglich ist und der winddurchlässige Aufbau eine weniger massive Unterkonstruktion benötigt. Die Praxistauglichkeit wurde bis jetzt jedoch noch nicht getestet und soll nun am Ihinger Hof erprobt werden (Kapitel 6.5.1).



Fig. 19 Pilotanlage der Firma TubeSolar (Foto: TubeSolar).

Das Next2Sun-Anlagenkonzept beinhaltet vertikale Module mit West-Ost-Ausrichtung, welche im Gegensatz zu anderen Systemen hauptsächlich am Vormittag und Abend Strom produzieren. Das vertikale bifaziale Agri-PV-System ist in seiner Form völlig neuartig von Next2Sun entwickelt worden. Die vertikalen Systeme eignen sich gut für Grünland und niedrig wachsende Kulturpflanzen. Für hochwachsende Kulturen wie Mais sind sie ungeeignet, da die Kultur die Panele verschatten würden. Die bisherigen beiden größeren Agri-PV-Anlagen von Next2Sun wurden auf landwirtschaftlich genutztem Dauergrünland errichtet (7 Hektar in Dirmingen (Fig. 20) und 14 Hektar in Donaueschingen). Laut Next2Sun konnten im Jahr 2020 in Dirmingen zwischen den Modulen höhere Erträge erwirtschaftet werden als auf Referenzflächen ohne Module. Am Standort Ihinger Hof soll die Anlage auf einem Ackerstandort errichtet werden und die Eignung der Anlage auch im Ackerbau untersucht und erprobt werden (Kapitel 6.5.1).



Fig. 20 Beschattung der Reihenzwischenräume am Nachmittag auf der Agri-PV-Anlage von Next2Sun in Dirmingen (Blick von Süden nach Norden) (Foto: Next2Sun).

Ob vertikale oder hoch aufgeständerte Systeme sich für die kombinierte Landnutzung mit Ackerbau besser eignen, konnte bis jetzt noch nicht ausreichend untersucht werden. In einer Studie von Riaz et al. (2021) wurden monofaziale, aufgeständerte Systeme mit Nord-Süd-Ausrichtung mit bifazialen, vertikalen Systemen mit West-Ost-Ausrichtung verglichen. Bei halber Moduldicke im Vergleich zu einer herkömmlichen PV-FFA, waren die Energieerträge, die Sonneneinstrahlung auf Pflanzenebene, sowie der LER beider Systeme vergleichbar. Mit steigender Moduldicke zeigten sich Unterschiede zwischen den Systemen: Durch die verringerten Modulabstände verschatteten sich die vertikalen Module gegenseitig und der Stromertrag reduzierte sich, während die verfügbare Sonneneinstrahlung auf Pflanzenebene anstieg. Bei aufgeständerten Systemen war der Stromertrag erhöht, während die Sonneneinstrahlung auf Pflanzenebene durch kleinere Modulabstände reduziert wurde.

Das bisher einzige nachgeführte Agri-PV-System in Deutschland wurde 2020 in Althegenberg, Bayern, installiert. Hier wurden einachsige bewegliche Module mit Trackingfunktion verwendet. Die Module wurden in einem Reihenabstand von 14 Meter installiert, um eine landwirtschaftliche Bewirtschaftung der Fläche zu ermöglichen. Die Aufständigung ist höher als bei einer PV-FFA, um eine Verschattung der Module durch die Kulturen zu vermeiden. Die Flächen direkt unter den Modulen können nur eingeschränkt benutzt werden, da Licht und Wasser nur bedingt verfügbar sind. Wissenschaftliche Daten zum Pflanzenwachstum unter dieser Anlage sind nicht verfügbar.

6.3 Potenzialanalyse

Ackerland nimmt in ganz Baden-Württemberg ca. 58 Prozent der landwirtschaftlichen Fläche ein und stellt damit anteilig die größte Flächennutzung dar, gefolgt von Grünland (39 Prozent), Weingärten (1,8 Prozent), und Gartenland (ein Prozent) (Rieke &

Wöllper, 2018). Somit stellt diese landwirtschaftliche Fläche das größte Flächenpotenzial für die Installation von Agri-PV-Anlagen dar. Alle ausgewählten Kulturen sind entweder flächenmäßig, aus ökologischen Gründen und/oder ökonomisch von großer Bedeutung in Baden-Württemberg. So wurden in Baden-Württemberg 2019 auf 212.300 Hektar Winterweizen und auf 5.700 Hektar Kartoffeln angebaut. Kleinsamige Leguminosen wie Rotklee und Luzerne sowie Körnerleguminosen wie Erbsen und Ackerbohnen wurden auf 61.500 Hektar angebaut. Weizen ist, gefolgt von Gerste, das häufigste angebaute Getreide in Baden-Württemberg (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg), wobei der Anbauumfang einem prozentualen Anteil von 15 Prozent der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Baden-Württemberg entspricht. Da sich der Anbau unter Agri-PV Systemen aufgrund der Beschattung negativ auf Erträge auswirken kann, stellt dies ein Risiko für die Wirtschaftlichkeit solcher Systeme dar. Auf der anderen Seite können Agri-PV Systeme insbesondere in heißen und trockenen Jahren positive Auswirkungen auf die Erträge haben, bzw. in hochaufgeständerten Systemen Starkregen-, Hagel- und Sonnenschäden mindern. Gerade Gemüsekulturen, aber auch Getreidebestände, könnten von dieser Schutzfunktion profitieren und höhere vermarktbare Erträge erzielen. Um den Einfluss der Beschattung umfassend untersuchen zu können, sollten Nutzpflanzen aus unterschiedlichen Pflanzenfamilien für die Untersuchungen ausgewählt werden, da diese unterschiedlichen Toleranzen gegenüber Beschattung aufweisen.

Um die Pariser Klimaziele zu erreichen, muss in Deutschland zukünftig verstärkt auf Photovoltaik zur Energieerzeugung gesetzt werden. Da das vertikale Agri-PV-System von Next2Sun auch auf großen Flächen ein kostengünstig realisierbares System ist, kann davon ausgegangen werden, dass solche Anlagen in Zukunft auch im Ackerbau genutzt werden, um Landnutzungskonflikte zu verringern. Außerdem stellt sich in Anbetracht der klimawandelbedingt steigenden Gefahr von Trocken- und Dürreperioden die Frage, ob die Beschattung durch Agri-PV-Anlagen zu Synergieeffekten und damit zu höheren bzw. stabileren Erträgen führt. Bei den vertikalen Agri-PV-Systemen von Next2Sun konnten diese positiven Effekte im Jahr 2020 vom Unternehmen selbst im Dauergrünland festgestellt werden. Allerdings fehlen bisher Daten für den Einfluss vertikal aufgeständerter Anlagen auf ackerbaulich genutzten Flächen. Das vorliegende Projekt würde Daten liefern, die helfen, einen solchen Einfluss abzuschätzen.

6.4 Standortübergreifende Organisation und Machbarkeit des Teilprojektes

6.4.1 Projektkoordination und Arbeitspakete

Im Rahmen des Teilprojektes Acker- und Gemüsebau sollen vier Agri-PV Anlagen mit unterschiedlichen Anlagendesigns an drei Standorten untersucht werden (Tabelle 15). Die Projektkoordination (AP 1) wird von der Universität Hohenheim übernommen und gliedert sich in die Koordination des Teilprojektes / der unterschiedlichen Standorte (AP 1.1) und die Zusammenarbeit im Rahmenprogramm (AP 1.2) (siehe Tabelle 16 und Gantt-Chart in Tabelle A 6 im Anhang A). AP 1.1 beinhaltet die Koordination zur Durchführung eines standortübergreifenden Forschungskonzepts. Bei den Forschungsarbeiten (AP 3) liegt der Schwerpunkt auf den beiden Anlagen auf dem Ihinger Hof, dort findet die Datenerhebung in zeitlich engen Intervallen statt. Die beiden Praxisanlagen Lindenbrunnenhof und Heggelbach sind die Forschungsarbeiten einbezogen, allerdings mit einer geringeren Forschungsintensität. Es ist geplant, auf allen Standorten eine ähnliche Messkampagne zu fahren, um Modelle für weitere Anlagen unterschiedlichen Bautyps kalibrieren zu können. Aufgrund der weiteren Entfernung von der Universität Hohenheim können jedoch bestimmte Daten, die nicht automatisiert über Da-

talogger erhoben werden können, nicht mit der gleichen Intensität erfasst werden wie auf dem Ihinger Hof. Um dies zumindest teilweise kompensieren zu können, wird auf dem Lindenbrunnenhof außerdem das LTZ Augustenberg (Standort Emmendingen) für die landwirtschaftliche Praxis relevante Daten in einer weiteren Agri-PV-Anlage eines neuartigen Bautyps erheben (siehe Kapitel 6.6.1).

Table 15 Übersicht über die Standorte Ihinger Hof, Lindenbrunnenhof, Hofgemeinschaft Heggelbach und die geplanten Agri-PV Anlagen.

	Ihinger Hof	Lindenbrunnenhof	Hofgemeinschaft Heggelbach
Bewirtschaftung	Konventionell	Biologisch	Biologisch-dynamisch
Betrieb	Forschungsbetrieb	Praxisbetrieb	Praxisbetrieb
Fruchtfolge	Weizen, Kartoffeln, Leguminosen	Weizen, Kartoffeln, Leguminosen	Weizen, Kartoffeln, Leguminosen
Anlagendesign	Vertikal (Next2Sun) + Röhrentechnologie (TubeSolar)	Mobiles System (Details noch nicht geklärt)	Horizontales, hoch aufgeständertes System (BayWa r.e.), bereits installiert
Anlagengröße	500 kWp	245 kWp	195 kWp
Standort	Renningen	Forchheim a.K	Herdwangen-Schönach

Table 16 zeigt eine Übersicht des Teilprojektes eines möglichen Forschungsvorhabens. Die Arbeitspakete sind entsprechend der Standorte aufgeteilt, wobei die Inhalte der Unterarbeitspakete jeweils über alle Standorte vernetzt sind.

Tabelle 16 Übersicht der Arbeitspakete des Teilprojektes.

AP	Titel	Zuständigkeit
AP 1	Projektkoordination	
AP 1.1	Koordination des Teilprojektes / des Standorts	UHOH
AP 1.2	Zusammenarbeit Rahmenprogramm	UHOH
Ihinger Hof		
AP 2	Konzeption, Implementierung u. Betr. Forschungsanlagen	
AP 2.1	Systemdesign: Strahlungssimulation u. Ertragsprognose	Fraunhofer ISE
AP 2.2	Entwicklung Unterkonstruktion	Next2Sun, TubeSolar, sbp
AP 2.3	Genehmigungsverfahren u. Aspekte der Raumplanung	Fraunhofer ISE
AP 2.4	Stromabnahme und Netzanschluss	Fraunhofer ISE
AP 2.5	Installation Forschungsanlage	Next2Sun, TubeSolar
AP 2.6	Installation Monitoring und techn. Betriebsführung (O&M)	Next2Sun, TubeSolar
AP 3	Agrarwissenschaftliche Analysen	UHOH
Lindenbrunnenhof		
AP 4	Konzeption, Implementierung u. Betr. Pilotanlagen	
AP 4.1	Systemdesign: Strahlungssimulation u. Ertragsprognose	Fraunhofer ISE
AP 4.2	Entwicklung Unterkonstruktion	<i>unbekannt</i>
AP 4.3	Genehmigungsverfahren u. Aspekte der Raumplanung	Florian Binder
AP 4.4	Stromabnahme und Netzanschluss	Florian Binder
AP 4.5	Installation Pilotanlage	<i>unbekannt</i>
AP 4.6	Installation Monitoring und techn. Betriebsführung (O&M)	<i>unbekannt</i>
AP 5	Agrarwissenschaftliche Analysen	UHOH
AP 5.1	Messung und Analyse (öko-) marktrelevanter Qualitätsparameter	LTZ
AP 5.2	Messung und Analyse von Schadorganismen	LTZ
Heggelbach		
AP 6	Nachrüstung Agri-PV-Anlage	
AP 6.1	Entwicklung Regenauffangsystem	<i>unbekannt</i>
AP 6.2	Installation	<i>unbekannt</i>
AP 7	Agrarwissenschaftliche Analysen	UHOH

6.5.1**Forschungskonzept und Innovationsgrad**

Auf dem Ihringer Hof soll eine Anlage der Firma Next2Sun und eine Anlage der Firma TubeSolar installiert werden.

Ein Versuchsstandort, der das vertikal aufgeständerte System der Firma Next2Sun im Ackerbau untersucht und beprobt, wäre bisher einmalig in Deutschland. Bei diesem Versuchsansatz ist unter anderem die Messung von landwirtschaftlichen Erträgen und der mikroklimatischen Heterogenität innerhalb der Modulreihen von hohem Interesse. Die geplante Anlage wird – wie die bisherigen Anlagen von Next2Sun – als vertikale bifaziale Anlage realisiert. Dabei werden mit dem patentierten System der Unterkonstruktion je zwei bifaziale Module liegend übereinander montiert. Die Bodenfreiheit beträgt etwa 60-80 Zentimeter, die Gesamthöhe der Aufbauten etwa 2,80 Meter. Die Höhe von vertikalen Systemen ist aus statischen Gründen auf drei Meter begrenzt, da die Module andernfalls eine zu große Angriffsfläche für Wind bieten würden. Die Installation auf dem Ihringer Hof soll in langen Reihen mit einem Reihenabstand von 14 Meter erfolgen, wodurch sich eine landwirtschaftlich nutzbare Arbeitsbreite von zwölf Meter ergibt, was auf die Arbeitsbreite der vorhandenen landwirtschaftlichen Maschinen abgestimmt ist. Zu den Modulen muss jeweils 0,5 Meter Abstand gehalten werden, um Beschädigungen der Module und der Unterkonstruktion durch Bearbeitungsmaßnahmen zu verhindern. Dies führt dazu, dass unterhalb der Module ein Streifen von 1,0 Meter Breite vorliegt, der nicht durch die landwirtschaftlichen Maschinen erfasst wird und ggfs. anderweitig gepflegt werden muss. Durch die Verwendung von Ramm-Fundamenten sind die Anlagen vollständig rückbaubar.

Für die Anlagen der Firma TubeSolar, die sich durch ihre Röhrentechnologie auszeichnen (vgl. Kapitel 6.2), wird aktuell eine geeignete, landwirtschaftstaugliche Aufständeringung entwickelt. Durch ihre Winddurchlässigkeit ist eine Leichtbauweise möglich, welche durch gespannte Tragebänder umgesetzt werden soll. Neben der gleichmäßigeren Wasser- und Lichtverteilung unter der Anlage im Vergleich zu hochaufgeständerten Solarmodulen, soll ein weiterer Vorteil der neuen Technologie darin liegen, dass die Module aufgrund der runden Oberfläche selbstreinigend sind. Außerdem liefern die Glasrohre einen gleichmäßigen Stromertrag über den Tag hinweg und könnten der Fläche unter der Anlage Schutz vor Starkregen und Hagel bieten.

Unter beiden Systemen und auf einem Referenzfeld soll parallel auf drei Streifen eine dreigliedrige Fruchtfolge, bestehend aus Winterweizen, Kartoffel und Leguminosen, in jedem Versuchsjahr angebaut werden, sodass es möglich ist, alle Kulturen in einem Zeitraum von mindestens drei Jahren oder länger (je nach Förderdauer) zu untersuchen. Da die Anlagen auf der Versuchsstation der Universität Hohenheim gebaut werden, steht nicht die Wirtschaftlichkeit der Anlagen im Vordergrund, sondern die Generierung eines wissenschaftlichen Mehrwertes, sodass verschiedene Messungen in einem großen Umfang möglich sind. Je nach Fördersumme und technischen Möglichkeiten der Aufständeringung der TubeSolar-Anlage lassen sich außerdem unterschiedliche Versuchsdesigns realisieren (Fig. 21). Für den Anlagenbau kommen zwei verschiedene Flächen für die Installation der Anlagen und der angeschlossenen, un bebauten Referenzfläche in Frage (Fig. 21). Auch die Anordnung der Flächen, sowie der Einbezug von Wiederholungen für die statistische Auswertung sind noch nicht abschließend geklärt. Für die Messungen der Land-Atmosphäre-Rückkopplung mit Eddy-Kovarianz-Stationen wären Anlagen mit den Maßen 100 Meter x 100 Meter ideal, sowie Flächen ohne hohe

Bäume oder andere Bauten in unmittelbarer Nähe, die die Windmessungen beeinflussen könnten. Die Fläche «Kleines Katzenloch» bietet dafür jedoch zu wenig Fläche, um beide Anlagen und die Referenzfläche nebeneinander zu platzieren. Die Anordnung nebeneinander ist hier aus versuchstechnischer Sicht zu präferieren, da eine leichte Hanglage auf der Fläche vorliegt (drei Prozent). Die zweite Fläche «Riech Süd» würde ausreichend Platz für die Umsetzung nebeneinander bieten, ist jedoch zum Teil von Bäumen gesäumt. Da Agri-PV-Anlagen in der Regel für eine Standzeit von ca. 20 Jahren geplant werden, ist es sinnvoll, ein Versuchsdesign zu wählen, das für möglichst viele Forschungsansätze nutzbar ist, was durch Wiederholungen ermöglicht würde (Fig. 21b). Ein Versuchs- und Anlagendesign mit vier Wiederholungen wäre auf dieser Fläche möglich, was jedoch mit deutlich erhöhten Kosten verbunden wäre.

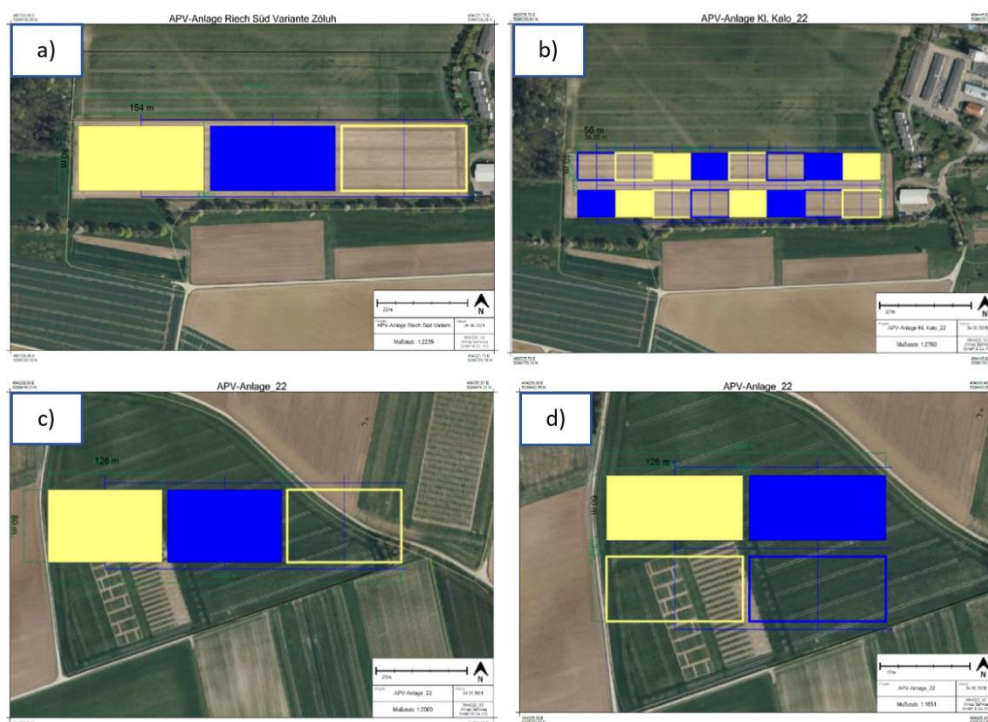


Fig. 21 Mögliche Anordnungen der Agri-PV-Anlagen auf zwei verschiedenen Flächen des Ihinger Hof der Universität Hohenheim: a) «Riech Süd», mit den beiden Anlagen und der Referenzfläche nebeneinander, b) «Riech Süd», mit vier Wiederholungen der Anlagen und Referenz.

Die Forschungsarbeiten der Universität Hohenheim auf dem Ihinger Hof untergliedern sich in die Arbeitspakete Koordination (AP1), Konzeption, Implementierung und Betrieb der Forschungsanlagen (AP 2), sowie in die agrarwissenschaftlichen Analysen (AP 3).

6.5.2 Machbarkeit

6.5.2.1 Organisatorische und zeitliche Machbarkeit

Das Gantt-Diagramm (Anhang A, Tabelle A 6) zeigt in welchem Zeitrahmen die nötigen Arbeitspakete umsetzbar wären.

Zu AP 2.1: Für die Planung der Anlagen wird das Fraunhofer ISE Strahlungssimulation für die Anlagen der Firmen TubeSolar und Next2Sun erstellen und arbeitet damit der Universität Hohenheim zu. Auf Basis der Strahlungssimulationen werden die Erträge

prognostiziert. Diese Daten werden zur Optimierung der Ausrichtung der Anlagen genutzt.

Zu AP 2.2: Da Next2Sun bereits Erfahrungen in der Entwicklung von Unterkonstruktionen hat, wird dieses Arbeitspaket für die vertikal aufgeständerte Anlage voraussichtlich mit drei Monaten eine kurze Zeit in Anspruch nehmen (siehe Gantt-Diagramm). Die Details der Unterkonstruktionsentwicklung bei der Anlage von TubeSolar sind bei Projektbeginn zu bestimmen.

Zu AP 2.3: Neben den baurechtlichen Verfahren muss bei Planung und beim Bau der Anlagen auf dem Ihinger Hof berücksichtigt werden, dass alle Bautätigkeiten an der Universität Hohenheim über die dem Finanzministerium unterstellte Abteilung Vermögen und Bau (VB) abzuwickeln sind. Hier ist zum jetzigen Kenntnisstand mit zeitlichen Verzögerungen in der Umsetzung zu rechnen. Auch hinsichtlich der rechtlichen Regelungen des Baus und des Betriebs der Anlagen zwischen Universität, Fraunhofer ISE, ggfs. externen Stromabnehmern und der Anlagenbauer kann im Augenblick keine Abschätzung der Dauer des Verfahrens getroffen werden, da eine solche Abschätzung sehr stark vom vorliegenden Modus der Finanzierung des Anlagenbaus- und betriebs abhängt. Da nach Aussage von VB-BW weitere Dachanlagen priorisiert geplant sind, würde der Eigenverbrauch des Ihinger Hofes nicht ausreichen, um wirtschaftlich zu sein. Die Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen ist jedoch das Hauptbewertungskriterium von VB-BW für Anlagenfinanzierung, die Übernahme der Kosten ist somit nahezu ausgeschlossen. Es wurde jedoch zugesichert die Flächen im Falle einer anderen Finanzierung die Flächen zur Verfügung zu stellen.

Das betroffene Gebiet liegt grundsätzlich in einem regionalen Grünzug, wobei hofnahe Flächen unproblematisch wären. Die gewählten Flächen (aufgrund flexiblerer Forschung) sind regionalplanerisch nicht optimal. Der Regionalverband Stuttgart würde sie jedoch mittragen, sofern die Ausweisung als »Sondergebiet Forschung« und der Forschungscharakter betont wird. Dies bedarf eines Gremienbeschlusses des Planungsverbandes.

Im Rahmen der Durchführung des Bauvorhabens sind außerdem versicherungstechnische Fragen hinsichtlich von Schäden an den Anlagen bzw. von möglichen Kontaminationen / negativer Beeinflussung des Standortes und Haftung bei Schäden zu klären. Gegebenenfalls muss daher neben auch der Justiziar der Universität Hohenheim einbezogen werden. Diese Abläufe hängen auch von dem Vorhandensein an Drittmitteln für den Bau und das Forschungsvorhaben und deren Ursprung (Vorgaben des Geldgebers, Fördervoraussetzungen) ab.

Aus diesen Gründen kann derzeit von einer Mindestdauer des Genehmigungsverfahrens von zwölf Monaten ausgegangen werden. Erst nach erfolgreich beendetem Genehmigungsverfahren kann mit der Anlagenentwicklung und -installation begonnen werden.

Zu AP 2.4: Eine Anfrage bei dem Netzbetreiber des Ihinger Hofes (Netze BW) für eine Anlage bzw. zwei Anlagen mit einer Leistung von insgesamt 350 kWp ergab im März 2021, dass der Bau eines neuen Trafo erforderlich wäre, um die Anlagen an das Stromnetz anzuschließen. Außerdem wird ein Netzanschluss auf Mittelspannungsebene benötigt. Hier muss vor Anlagenbau eine EEG-Anfrage bei dem Netzbetreiber NetzeBW eingereicht werden. Die NetzeBW berechnet innerhalb von acht Wochen verbindlich den Netzanschlusspunkt und die Netzausbauezeit. Nach Stellung der EEG-Anfrage sollte mit mindestens drei Monaten gerechnet werden, bis die Anlage in Betrieb genommen werden kann. Die genauen Netzanschlusskosten müssen daraufhin bei einem Dienstleister angefragt werden. Hier wären mit Kosten von ungefähr 80.000 € zu rechnen. Ein Teil des produzierten Stroms wird vom Ihinger Hof selbst verbraucht. Hier bestünde die Möglichkeit, verstärkt auf Elektromobilität zu setzen, um den Eigenverbrauch zu erhöhen. Der restliche Strom wird durch einen Direktvermarkter vermarktet. Hier kann zwischen verschiedenen Unternehmen gewählt werden.

Über dieses Vorhaben muss von der Universität Hohenheim und der Abteilung VB des Finanzministeriums entschieden werden, zentral sind hierbei die Förderung des Anlagenbaus, die gesetzlichen Vorgaben zum Eigenverbrauch sowie weitere Bauvorhaben auf den Ihinger Hof wie z. B. der Bau von Dach-PV. Zu diesen Aspekten liegen aktuell keine Informationen vor, so dass die zeitliche und organisatorische Machbarkeit nicht abschließend bewertet werden.

Zu AP 2.5: Die Installation der Forschungsanlage von Next2Sun wird ungefähr sechs Monate in Anspruch nehmen und kann mit einem Monat Vorlaufzeit nach der Entwicklung der Unterkonstruktion erfolgen (siehe Gantt-Diagramm). Der Installationszeitraum der Anlage von TubeSolar ist bei Projektbeginn zu bestimmen.

Zu AP 2.6: Die Installation des Monitorings und der technischen Betriebsführung in der Next2Sun-Anlage kann parallel während der letzten drei Monate der Anlageninstallation vorgenommen werden (siehe Gantt-Diagramm). Bei der Anlage von TubeSolar ist dies bei Projektbeginn festzulegen.

Zu AP 3: Im AP 3 werden agrarwissenschaftliche Messungen u. a. zum Ertrag der jeweiligen Kulturen durchgeführt. Die Messungen werden in allen drei Versuchsjahren durchgeführt. Die geplanten Arbeiten werden in den insgesamt vier Jahren Projektlaufzeit durchführbar sein.

6.5.2.2

Technische Machbarkeit

Technische Rahmenbedingungen aufgrund von Standortfaktoren

Die Maschinen auf dem Ihinger Hof benötigen eine Arbeitsbreite von zwölf Metern, sodass für die Konstruktion ein Reihenabstand von circa 14 Metern benötigt wird. Für Anlagen der Firma Next2Sun sind die Reihenabstände frei wählbar, da es sich um vertikale Module handelt. Für eine Anlage der Firma TubeSolar ist ein Reihenabstand von 14 Metern ebenfalls technisch realisierbar.

Der vorgesehene Schlag hat eine Hangneigung von circa drei Prozent, diese stellt für den Bau der Anlagen keine Herausforderungen da. Bei der Fundamentierung sollte beachtet werden, dass der Standort durch tiefgründige Lössböden charakterisiert ist und daher eine tiefere Verankerung notwendig ist. Stromanschluss und Trafobau sind technisch umsetzbar.

Technisches Konzept der Anlage

Da bereits mehrere vertikale Agri-PV-Anlagen von Next2Sun auf Grünlandstandorten in Deutschland gebaut worden sind und landwirtschaftlich genutzt werden, bestehen grundsätzlich keine Bedenken hinsichtlich der Realisierbarkeit des Anlagenbaus. Für die Verwendung von vertikalen Modulen in Kombination mit Ackerbau liegen noch keine Erfahrungen vor. Die niedrige Höhe des Systems könnte zum einen dazu führen, dass die gepflanzten Kulturen die Panele verschatten, auf der anderen Seite könnte ackerbautechnische Maßnahmen die Panele verschmutzen. Beides würde zu einem reduzierten Stromertrag führen. Zudem kann die partielle inhomogene Lichtverteilung unmittelbar neben den Panele zu ungleichmäßiger Fruchtreife führen.

Das Konzept der Röhrentechnologie von TubeSolar ist vielversprechend, da die Röhren für eine gleichmäßigere Licht – und Regenverteilung sorgen können als beispielsweise die Agri-PV Anlage in Heggelbach. Auch das Erzeugungsprofil der Module ist sowohl für das Stromnetz als auch den Eigenverbrauch vorteilhaft, da die Rohre auf der oberen Hälfte mit Dünnschicht PV belegt sind. Dadurch wird über den ganzen Tag Strom er-

zeugt und nicht nur bei bestimmten Sonnenständen, wie bei Südausrichtung üblich. Durch die Röhrendichte und Charakteristika der Dünnschicht Module bleibt der Gesamtertrag jedoch unter denen von Standard oder semi-transparenten Modulen. Der Ertrag ist durch Weiterentwicklungen zu steigern.

Netzanschluss

Aufgrund der geplanten Leistung der Anlagen muss ein neuer Trafo errichtet werden. Der Standort ist dabei abhängig von der schlussendlich ausgewählten Versuchsfläche. Ein Standort nahe einer Hofstelle mit bestehendem Netzanschluss wird aber aus Kostengründen in jedem Fall angestrebt. Die technische Umsetzbarkeit von Stromanschluss und Trafo sind laut Aussage des Netzbetreibers gegeben.

6.5.2.3

Wirtschaftliche Machbarkeit

Da auf dem Ihinger Hof intensivere Messungen durch die Universität Hohenheim geplant sind als auf den anderen Standorten, wurden alle Kosten, die die Universität Hohenheim betreffen, dem Ihinger Hof zugeordnet, auch die Kosten, die für die Messungen auf dem Lindenbrunnenhof und in Heggelbach stattfinden. Die Forschung ist so eng verzahnt, dass es nicht sinnvoll ist, hier die Kosten bezogen auf die Standorte auszuweisen, da auch ein Teil der Messgeräte auf unterschiedlichen Standorten genutzt werden. Die Kosten des Netzanschlusses hängen vom zugewiesenen Netzanschlusspunkt ab. Eine Anfrage bei der NetzeBW ergab außerdem, dass der Bau eines neuen Trafos erforderlich wäre. Die Kosten wurden auf 80.000 € geschätzt. Der Strom wird durch einen Direktvermarkter an der Strombörse vermarktet. Der Strompreis beträgt durchschnittlich 0,05 €. Außerdem sollen Agri-PV-Systeme ab 2022 auch durch das EEG gefördert werden. Bis zu einer Anlagengröße von 750 kWp haben Anlagenbauer einen gesetzlichen Anspruch auf eine Marktprämie, welche von der Bundesnetzagentur bestimmt wird. Da es sich bei den beiden Anlagen um Forschungsanlagen handelt, steht die Wirtschaftlichkeit der Anlagen nicht im Vordergrund. Das heißt, dass ohne eine Förderung über Dritte der Bau der Anlagen aus rein wirtschaftlichen Gründen nicht umsetzbar ist.

6.5.2.4

Risikobewertung

Die Flächen des Ihinger Hofes sind im Besitz des Landes und werden von VB verwaltet. In Vorgesprächen mit VB durch das Fraunhofer ISE für alle Standorte des Gesamtvorhabens ergab sich für den Standort keine Möglichkeit der Eigentümerschaft durch VB, da Dachanlagen geplant sind und der Eigenverbrauch zu gering für eine ausreichende Wirtschaftlichkeit im Sinne von VB ist. VB sichert jedoch zu, die Flächen für ein Projekt zur Verfügung zu stellen. Mögliche alternative Lösungsansätze wären zum Beispiel die Finanzierung über einen externen Investor, wie es bei der Anlage in Heggelbach durch das Fraunhofer ISE der Fall war. Allerdings müssten in diesem Fall komplexe vertragliche Regelungen zwischen den Partnern getroffen werden, was vermutlich Auswirkungen auf die zeitliche Realisierbarkeit des Projektes hätte.

Ein weiteres Risiko stellt der Erhalt der Baugenehmigung dar. Bei ersten Vorgesprächen im Rahmen dieser Machbarkeitsstudie zeigte sich, dass die zuständigen Gemeinde Renningen und der Regionalverband dem Projekt positiv gegenüberstehen, so dass das dieses Risiko aktuell als gering eingeschätzt wird. Die weiteren erforderlichen Gutachten (Umwelt-, Boden-, und Blendschutzgutachten, Windlastenprüfung) stellen nach aktueller Einschätzung ebenfalls ein geringes Risiko dar, da die Versuchstation Ihinger Hof beispielsweise keinen besonderen Auflagen (z. B. durch die Lage in einem Land-

schaftsschutzgebiet) unterliegt. Eine Übersicht der Risiken befindet sich im Anhang A (Tabelle A 8)

6.6 Standort Lindenbrunnenhof

6.6.1 Forschungskonzept und Innovationsgrad

Ziel des Projektes am Standort Lindenbrunnenhof ist die Installation einer flexiblen oder mobilen Agri-PV-Anlage (z. B. nachgeführte Module oder Container mit Faltdächern), mit der bedarfsorientiert entweder die landwirtschaftliche Produktion oder die Energieproduktion optimiert werden kann. Ein flexibles Lichtmanagement bietet außerdem die Möglichkeit auf besondere Ereignisse wie z. B. wiederholt trübe und nasse Tage zu reagieren. Wie sich im Mai/Juni/Juli 2021 gezeigt hat, entscheidet das Abtrocknen des Kartoffellaubs während der wenigen Sonnenstunden über erheblichen Ernteverlust durch auftretende Krautfäule (*Phytophthora infestans*).

Für die Installation der Anlage stellt der Lindenbrunnenhof eine Fläche von ca. 3.375 m² zur Verfügung – die gleiche Flächengröße kann als Referenzfeld genutzt werden. Die Flächen wurden bisher homogen bewirtschaftet (Fig. 22). Eine Kartierung der Fläche wurde von der Universität Hohenheim bereits durchgeführt. Aus der Bodenansprache im Rahmen der Kartierung lässt sich schließen, dass die Fläche ausreichend homogen ist, um als Versuchsstandort zu dienen. Auf dem Lindenbrunnenhof wird – in Abstimmung mit den anderen Versuchen des Teilprojekts – eine Fruchtfolge bestehend aus Winterweizen, Kartoffel und einer Leguminose angebaut werden. Flächen, welche durch die Agri-PV-Konstruktion nicht landwirtschaftlich genutzt werden können, sollen als Blühstreifen dienen.



Fig. 22 Vorgesehener Standort der Agri-PV-Anlage sowie der Referenzfläche auf dem Lindenbrunnenhof.

Zur Entwicklung eines flexiblen oder mobilen Systems fanden bereits Gespräche mit Technikpartnern dhp-technology, Hilber-Solar, sbp, Baywa r.e. und Urbanbox statt. Eine Zusammenarbeit mit dhp-technology ist aufgrund eines fehlenden geeigneten Konzepts nicht möglich. Auch eine Zusammenarbeit mit Baywa r.e. musste ausgeschlossen werden, da die verfügbare Flächengröße nicht geeignet ist.

Um in einer viergliedrigen Fruchtfolge, wie sie im ökologischen Landbau üblich ist, auf die kulturspezifischen Anforderungen an Licht- und Mikroklimaverhältnisse achten zu können, eignen sich anpassbare Nachführsysteme. Es gibt bereits Standardvarianten dieser Systeme, aber vor dem Hintergrund von Agri-PV muss untersucht werden, welche flexiblen Systeme sich am Standort Lindenbrunnenhof sinnvoll implementieren lassen. Aus den initialen Überlegungen und Absprachen ergaben sich drei mögliche Optionen, welche im Rahmen einer Vorstudie untersucht wurden. Die drei Systemvarianten sind nachfolgend beschrieben und werden in Kapitel 6.6.2.3 verglichen. Die finale Systemauswahl für den Standort hängt von den Fördermöglichkeiten und der Förderstrategie ab.

Leichtes Trackingsystem und fixiertes System – sbp

Schlauch Bergermann Partner (sbp) entwickelt bereits die Unterkonstruktion der TubeSolar AG Anlagen (siehe 6.5.1). Neben den derzeit in der Entwicklung befindlichen Röhrenmodulen soll die abgespannte Unterkonstruktion auch für flächige, semitransparente und bifaziale Module im Ackerbau verwendet werden. Das leichte System verspricht im Gegensatz zur massiven Bauweise vergleichbarer Systeme erhebliche Kosteneinsparungen. In Fig. 23 ist beispielhaft ein Ost-West-ausgerichtetes System mit fixierten Modulen auf der Fläche des Lindenbrunnenhofs dargestellt (Variante »EW-Fix«). Eine ähnliche Unterkonstruktion soll für ein Trackingsystem (Variante »EW-Track«) entworfen werden. Das abgebildete fixierte Ost-West-System, welches je nach Förder szenarios trotz der fehlenden Flexibilisierung als Favorit hervorgehen könnte, wird als wirtschaftliche Alternative für den Standort Lindenbrunnenhof angesehen. Im Vergleich zu den anderen Agri-PV-Systemen im TP Ackerbau (siehe Kapitel 6.5 und 6.7), sind mikroklimatische und verschattungsbedingte Unterschiede zu erwarten, was dem angedachten Forschungskonzept im Teilprojekt dienlich ist.

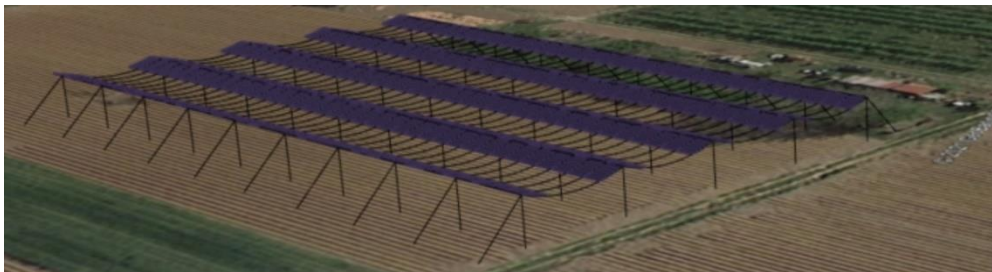


Fig. 23 Illustration des abgespannten Tragsystems von sbp mit Modulanordnungen in Ost-West-Ausrichtung.

Für ein gezieltes Lichtmanagement kann der Trackingalgorithmus (aus EW-Track), für mehr pflanzenverfügbares Licht angepasst werden. Die resultierende Modulbewegung wird Antitracking (»EW-Track-AT«) genannt. Nähere Ausführungen zum Lichtmanagement mittels Antitracking sind in den Kapiteln 1.1 und 3.5.2.2 »Systemfunktionalität« beschrieben.

Fig. 24 zeigt den Einfluss der verschiedenen Varianten (»EW-Fix«, »EW-Track« und »EW-Track-AT«) auf den elektrischen Ertrag (unten), sowie auf die photosynthetisch aktive Strahlung auf Pflanzenlevel (oben). Eine detaillierte Beschreibung der Graphik ist ebenfalls in Kapitel 3.5.2.2 »Systemfunktionalität« zu finden.

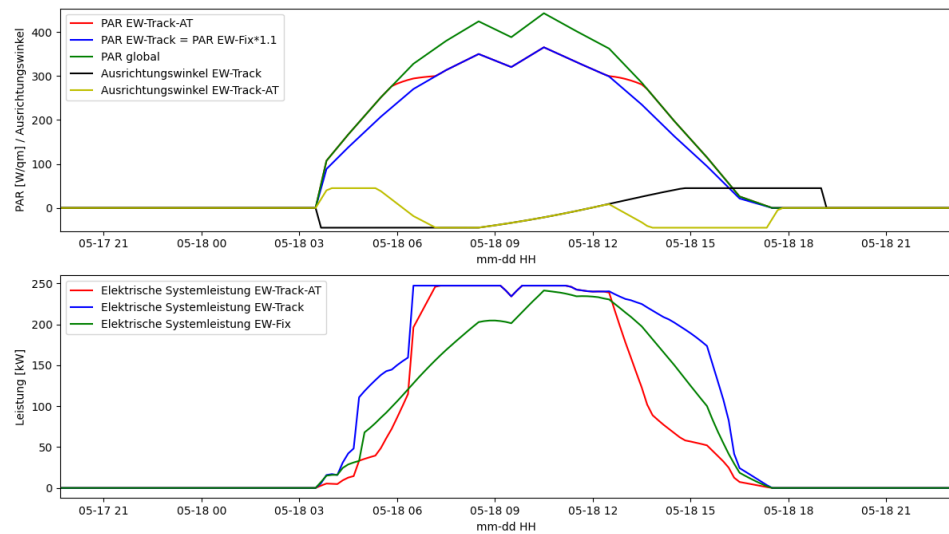


Fig. 24 Oben: Simulierte Ausrichtungswinkel der Varianten "EW-Track-AT" und »EW-Track«, sowie simulierte PAR-Levels auf Pflanzenebene je nach System; Unten: Leistungsverlauf der verschiedenen Systeme.

Faltbares Solardach – Urbanbox

Urbanbox (UB) hat das Potenzial in Zusammenarbeit mit dem Lindenbrunnenhof ein entsprechendes Agri-PV-System zu entwickeln und ist derzeit als Technikpartner ange-dacht. Urbanbox wurde durch die Firma Iworks AG entwickelt und patentiert. Ein erstes Demonstrationssystem für urbane Anwendungen wird 2021 in Liechtenstein realisiert. Die aus- und einfahrbare Solardach Lösung ist einfach anpassbar für Agri-PV Anwen-dungen mittels eines Abstandhalters zwischen den Modulträgern. Das System sieht die Verwendung eines aus- und einfahrbaren Solardachs vor, welches bei starkem Wind oder Schneefall in eine robuste Box eingezogen werden kann (Fig. 25). Wenn die Be-wegungsrichtung der Module und die Richtung der landwirtschaftlichen Bearbeitung übereinstimmen, kann durch das Einfahren der Module das Feld mit hohen Maschinen bearbeitet werden. Damit kann das System eine niedrigere und leichtere Unterkon-struktion als aufgeständerte Systeme haben, was Material und Kosten einsparen wür-de. Ein weiteres Kosteneinsparpotenzial ergibt sich durch die geringere Windbelastung. Bei Starkwind fährt das System automatisch in < vier Minuten ein. Laut Franz Baumgartner (2020) sollten flexible PV-Anlagen bei Windstärken über 15 m/s in ihrer Box sein, was die Auslegung nach Windlastzone 1 (22,5 m/s) hinfällig macht. Da solch hohe Windgeschwindigkeiten nur selten vorkommen, wird von PV-Ertragsverlusten unter einem Prozent ausgegangen. Diese Verluste können im Winter ausgeglichen werden, da bei Schneefall ebenfalls eingefahren und Schneebeleg verhindert werden kann. Außerdem birgt die Technologie das Potenzial, die Installationskosten zu senken, da die Module nicht über der Fläche montiert werden müssen. Die Montage kann bis auf die Unterkonstruktion komplett werkseitig erfolgen. In diesem Zusammenhang ist eine flexible Neupositionierung der kompletten Agri-PV-Anlage denkbar, denn auch der Abbauaufwand kann wesentlich geringer ausfallen. In Kombination mit Ackerbau könnten durch das Ein- und Ausfahren des Faltdachs die angebauten Pflanzen unterhalb der Anlage flexibel verschattet werden. Die Module haben einen Neigungswinkel von 0°. In der Box ist außerdem ein Reinigungsmechanismus integriert, welcher die PV-Module beim Ein- und Ausfahren säubert. Neben Gesprächen mit Technikpartner wurden Gespräche mit dem Energieversorgungsunternehmen Badenova geführt, da hier die Möglichkeit einer Beteiligung besteht. Varianten des Systems werden im Folgenden mit dem Kürzel »UB-...« betitelt.



Fig. 25 Illustration des ausziehbaren PV-Systems von Urban-box (Skizze: Urbanbox).

Die violette Kurve (GCR-Flexibilisierung) in Fig. 26 zeigt die täglich flexible GCR (Flächenbelegungsrate) des Systems, welche durch die Mobilität der Module erreicht wird. Bei einer GCR-Flexibilisierung von Null befinden sich die Module über den Pflanzen. Nachts sollen sie vor Spätfrost schützen und mittags Strom generieren. Morgens und abends werden die Module eingefahren (GCR-Flexibilisierung 90) um den Pflanzen genügend Licht zu bieten. Durch die Bewegung der Module entspricht das pflanzenverfügbare Licht (rote Kurve) zeitweise dem unter freiem Himmel (grüne Kurve). Die Systemleistung im eingefahrenen Zustand ist null.

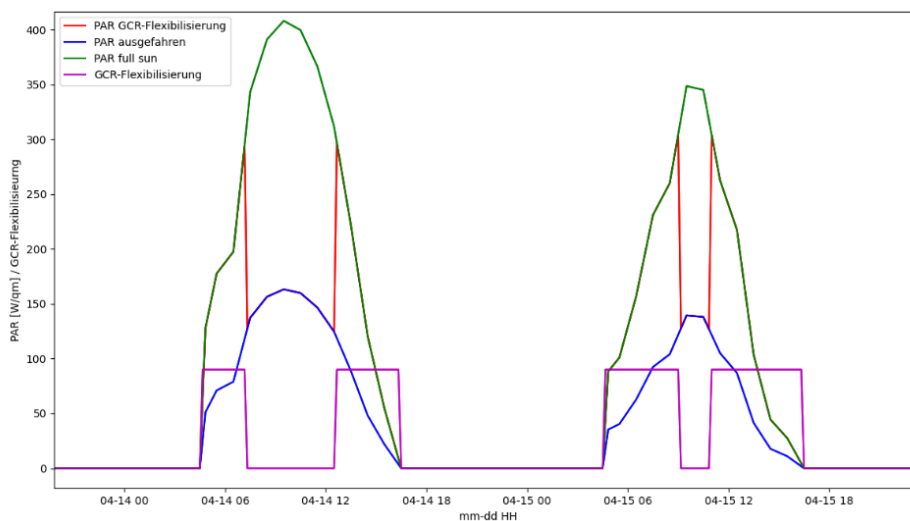


Fig. 26 GCR-Flexibilisierung und pflanzenverfügbare PAR beispielhaft an zwei Tagen im April.

Forschungskonzept

Auf dem Lindenbrunnenhof sollen agrarwissenschaftliche Messungen (AP 5) durchgeführt werden. Ein besonderer Stellenwert soll jedoch auf die Erfassung der Auswirkungen von Agri-PV auf (öko-)marktrelevante Qualitätsparameter (AP 5.1) gesetzt werden. Die Qualität der erzeugten Produkte stellt ein maßgebliches Kriterium zur Vermarktung dar. Um die Anwendbarkeit der Agri-PV für die Erzeugung qualitativ hochwertiger landwirtschaftlicher Erzeugnisse zu evaluieren, ist daher eine Untersuchung des Einflusses auf Qualitätsmerkmale unbedingt erforderlich. Hierfür sollen Vermarktungskriterien und wichtige kulturspezifischer Qualitätsparameter erfasst werden. Außerdem sollen

die Auswirkungen von Agri-PV auf die Entwicklung von besonders relevanten Schadorganismen analysiert werden (AP 5.2). Wie in bisherigen Studien gezeigt wurde, hat die Agri-PV einen Einfluss auf das Mikroklima unter der Anlage. So wurden neben einer verminderten Sonneneinstrahlung und Bodentemperatur, auch eine erhöhte Luftfeuchtigkeit festgestellt. Insbesondere Letztere kann, in Kombination mit veränderten Windgeschwindigkeiten und erhöhte Blattfeuchte im Ablauf der Panelkanten, das Auftreten von Blattkrankheiten unter der Anlage begünstigen. Daher soll im Rahmen des Versuchs auf dem Lindenbrunnenhof das Auftreten von pilzlichen Schaderregern an den verschiedenen Kulturen durch zusätzliche Bonituren im Vegetationszeitraum erfasst werden. Allgemeine Ertragsuntersuchungen werden von der Uni Hohenheim ausgeführt, AP 5.1 und AP 5.2 vom LTZ. Auf dem Lindenbrunnenhof stehen vor allem Wirtschaftlichkeit und Praxisrelevanz im Vordergrund.

6.6.2 Machbarkeit

6.6.2.1 Organisatorische und zeitliche Machbarkeit

Die Arbeitspakete und ein Vorschlag der zeitlichen Umsetzung befinden sich im Anhang A in Tabelle A 6 und Tabelle A 7.

Zu AP 4.1: Das Fraunhofer ISE erstellt Strahlungssimulation für die geplante Anlage des noch unbekanntem Unternehmens, die auf dem Lindenbrunnenhof installiert werden sollen. Auf Basis der Strahlungssimulationen werden die Erträge prognostiziert.

Zu AP 4.2: Da aktuell noch nicht endgültig entschieden ist, welches Unternehmen den Bau der Anlage übernehmen wird, kann zur Entwicklung der Unterkonstruktion noch keine genaue Aussage gemacht werden. Wird eine Anlage der Firma Urbanbox umgesetzt, so kann davon ausgegangen werden, dass die Unterkonstruktion neu entwickelt und auf die Anforderungen des Ackerbaus angepasst werden muss. Hierfür wurden sechs Monate eingeplant.

Zu AP 4.3: Da der Lindenbrunnenhof die Möglichkeit hat, selbst als Betreiber und Bauherr der Anlage aufzutreten, wird davon ausgegangen, dass das Genehmigungsverfahren deutlich schneller als beispielsweise bei den Anlagen auf dem Ihinger Hof umgesetzt werden kann. Ein genaues Zeitfenster lässt sich jedoch noch nicht abschätzen. Rücksprachen mit der interessierten Gemeinde Forchheim und dem Regionalverband Südllicher Oberrhein ergaben, dass es keine Bedenken hinsichtlich Baugenehmigung und Raumplanordnung gibt. Grundsätzlich ist die offene Bauweise des angedachten Agri-PV-Systems und die generelle lichtdurchlässige Ausführung von Agri-PV-Systemen dem Fortbestand des Ökosystems dienlich. Die eventuellen zusätzlichen Hürden stellen kein Ausschlusskriterium für die Projektumsetzung dar.

Zu AP 4.4: Um die Anlage an das Netz anzuschließen ist der Bau einer neuen Zählerstation auf dem Lindenbrunnenhof geplant. Hierfür erfolgte bereits eine Netzverträglichkeitsprüfung auf Basis von Schätzwerten, mit dem Ergebnis, dass der Netzanschluss problemlos im Niederspannungsbereich möglich ist. Der Eigenverbrauch des Lindenbrunnenhofs wurde auf ca. ein Prozent geschätzt. Der überwiegende Anteil des produzierten Stroms der Anlage des Lindenbrunnenhofs wird voraussichtlich von Badenova abgenommen. Für die Stromabnahme und den Netzanschluss ist ein ungefährer Zeitrahmen von vier Monaten vorgesehen.

Zu AP 4.5: Nach aktuellem Stand soll auf dem Lindenbrunnenhof eine Anlage der Firma Urbanbox installiert werden. Da die Montage des faltbaren Solardachs werkseitig

erfolgt, kann von einer Installation der Anlage von innerhalb vier Monaten ausgegangen werden.

Zu AP 4.6: Für die Installation der Messgeräte für ein Monitoring und die technische Betriebsführung wurden zwei Monate eingeplant. Ertragsbewertungen und regelmäßige Begutachtung von Verschleiß und möglichen Schwachstellen werden durchgeführt.

AP 5: Auf dem Lindenbrunnenhof sind wie auf dem Ihinger Hof agrarwissenschaftliche Erhebungen geplant.

AP 5.1 und 5.2.: Für die Messung und Analyse (öko-)marktrelevanter Qualitätsparameter, sowie von Schadorganismen werden vom LTZ über die drei Versuchsjahre Messungen über einen Zeitraum von zwei Monaten im Sommer des jeweiligen Jahres durchgeführt.

6.6.2.2

Technische Machbarkeit

Technischen Rahmenbedingungen aufgrund von Standortfaktoren

Bei der Anlagenplanung sollten die Maschinen des Lindenbrunnenhofs berücksichtigt werden. Besonders die Arbeitsbreiten spielen eine wichtige Rolle. Beim Urbanbox-System kann das Solardach zwar eingefahren werden, die Unterkonstruktion jedoch nicht. Die Arbeitshöhen der Maschinen müssen in Betracht gezogen werden, falls eine Bearbeitung des Feldes bei ausgefahrenem Solardach geplant ist. Unabhängig vom Anlagensystem gelten folgende technischen Rahmenbedingungen:

- Da ggf. Seil-Abspannungen für die Unterstützung der Statik der Agri-PV-Systeme zum Einsatz kommen, wurden 3.243 m² als Agri-PV-Fläche vorgesehen. So ergibt sich z. B. die Möglichkeit entlang der westlichen Flächenkante einen zwei Meter breiten Abspannstreifen vorzusehen.
- Flächen im Acker- und Gemüsebau sind hinsichtlich der Nutzung nicht über mehrere Jahre hinweg definiert, wie es bei Dauerkulturen (z. B. Weinreben und Obstbäume) der Fall ist. Eine möglichst flexible Gestaltung der Agri-PV-Anlage oder optional die Aufhebung der Flächenbindung ist erwünscht.
- Erntemaschinen mit einer Höhe von vier Metern und einer Arbeitsbreite von neun Metern müssen berücksichtigt werden.
- Um Randabstände zu berücksichtigen, soll die Durchfahrtsbreite mehr als zehn Meter betragen.
- Biobetrieb: Bei Krautfäule-Gefahr muss von Kupferspritzungen ausgegangen werden.
- Eine homogene Regenwasserverteilung (keine Abtropfkanten) sowie Lichtverteilung sind erwünscht.
- Der Ernteertrag sollte > 80 Prozent (verglichen mit der Referenz) sein.
- Vorrangige Berücksichtigung der bestehenden ~65 kWp Dachanlagen für den Eigenverbrauch (nach Auslaufen der EEG-Förderung).
- Eine Systeminstallation, ohne die landwirtschaftliche Fläche zu beschädigen, sollte möglich sein. Im besten Fall werden keinem schweren Krane notwendig. Von einer Baustellenmontage sollte möglichst abgesehen werden.

Technisches Konzept der Anlage

Das System der Firma Urbanbox (»UB-...«) wurde neu entwickelt und noch nicht getestet. Das Konzept wurde für den Einsatz in der Stadt entworfen und muss auf die Ver-

wendung in der Landwirtschaft angepasst werden. Eine geeignete Unterkonstruktion, die die landwirtschaftliche Bewirtschaftung des Feldes ermöglicht, ist notwendig. Besonders das häufige Ein- und Ausfahren des Solardachs erfordert eine entsprechend ausgereifte Technik. Das Trackingsystem der Firma sbp (»SBP-...«) bietet ebenfalls die Vorteile der Leichtbauweise – allerdings muss, im Gegensatz zum Urbanbox-System, die maximale Maschinenhöhe berücksichtigt werden. Eine Zusammenfassung der wichtigsten Auslegungsparameter, welche für die Berechnungen in 6.6.2.3 verwendet wurden, sind in Tabelle 17 dargestellt. »Süd-Ref« ist eine Süd-ausgerichtete Vergleichs-PV-FFA mit Standardparametern aus Schindele et al. (2020), welche auf der gleichen Fläche Platz finden kann.

Tabelle 17 Designparameter verschiedener Agri-PV-Anlagentypen.

	UB-Fix	UB-Flex	UB-Flex-40	SBP-Fix	SBP-Track	SBP-Track-AT	SBP-Track-AT-55	Süd-Ref
GCR* [%]	35	35	56	35	35	35	45	47
Modultransparenz [%]	41,5	41,5	41,5	41,5	41,5	26,3	26,3	0
Reihenabstand [m]	2,78	2,78	1,68	2,78	2,78	2,78	2,78	7
Bifazial	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein
PAR-Ziel [%]	60	75	75	60	60	75	75	-
Ausrichtung [°] (N=0, E=90, S=180, W=270,)	200	200	200	290/70	200	200	200	180
Neigungswinkel [°]	0	0	0	15	+90	+90	+90	20
DC Leistung [kWp]	221	221	370	221	221	221	284	297

*(inkl. Transparenz)

Folgende weitere Designmerkmale wurden für die Systeme »UB...« vorgesehen:

- Ziel PAR wurde mit 60 Prozent (Trommsdorff et al. 2021) definiert, was mit der Systemvariante »UB-Fix« im durchgehend ausgefahrenen Zustand erreicht wird, indem ein Reihenabstand/Modullängen-Verhältnis von ~1,7 gewählt wird. UB-Flex repräsentiert eine identische Variante, nur ein- und ausfahrbar. Für Variante UB-Flex-40 wird der Reihenabstand verkleinert, was zu einer relativen PAR (ohne weitere Maßnahmen) von 40 Prozent führt.
- Damit die Flexibilität der ausfahrbaren Module in Bezug auf die Kostenreduktion durch geringere Höhenanforderungen ausgenutzt wird, wurde eine Durchfahrthöhe von drei Metern für alle GCR-flexiblen Systeme veranschlagt. So ist sichergestellt, dass zumindest Bodenarbeiten mit Traktoren und Handerte bzw. Ernte mit niedriger Maschinenhöhe auch bei ausgefahrenen PV-Modulen möglich ist (Agrarheute, 2021).

Folgende weiteren Designmerkmale sind für die Systemvarianten von sbp »SBP-...« vorgesehen:

- Die Variante »SBP-Track-AT« entspricht dem System »SBP-Track« mit Antitracking-Funktionalität. In »SBP-Track-AT-55« werden zusätzlich intransparentere Module (Transparenz: 26.3 Prozent) für eine GCR von ca. 45 Prozent simuliert, wobei die initiale relative PAR in horizontaler Modulstellung von 55 Prozent durch Antitracking wieder in der Wachstumsphase angehoben wird. Leistungsdaten der Anlagenvariante wurden anhand GCR skaliert.
- Ziel PAR wurde mit 60 Prozent (Trommsdorff et al. 2021) definiert, was mit der Systemvariante »SBP-Fix« im stationären Zustand erreicht wird.

Da bei Kulturen der Verschattungskategorie »Minus« (siehe 6.6.2.3) etwa 75 Prozent PAR statt 60 Prozent notwendig wären, um 80 Prozent des Ertrags zu erzielen, kann mittels Antitracking (Varianten »SBP-...«) oder GCR-Flexibilisierung (Varianten »UB-...«) in der Wachstumsphase die Lichtverfügbarkeit kulturspezifisch erhöht werden. Das PAR-Level für die Antitracking-Steuerung (siehe 3.5.2.2) würde so adaptiert, dass die entsprechende Lichtverfügbarkeit erreicht wird. An einem typischen, durchschnittlichen Maitag ergibt sich auf dem Lindenbrunnenhof eine PAR von $\sim 179 \text{ W/m}^2$, gemittelt von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang (European Commission, 2021). Bei 40 Prozent Verschattung wären durchschnittlich $107,4 \text{ W/m}^2$ für die Pflanzen verfügbar. Wird das PAR-Level für die Steuerung auf 75 Prozent ($134,25 \text{ W/m}^2$) eingestellt, würde morgens und abends die Lichtverfügbarkeit angehoben werden. Nach den Ertragsmodellen aus 6.6.2.3 ließen sich so entsprechenden Erträge erreichen.

Netzanschluss

Für den Lindenbrunnenhof erfolgte bereits eine Netzverträglichkeitsprüfung auf Basis von Schätzwerten (siehe AP 4.4). Eine Einspeisung in die Niederspannungsebene ist möglich. Es muss lediglich eine neue Zählersäule Projekt-seitig verbaut werden. Die Leitungslänge von dem Agri-PV-System zum Einspeisepunkt beträgt ca. 350 Meter.

6.6.2.3

Wirtschaftliche Machbarkeit

Da noch nicht feststeht welches System auf dem Lindenbrunnenhof installiert werden soll, werden die Kosten und die Wirtschaftlichkeit der verschiedenen Agri-PV-Systeme beleuchtet.

Um die technoökonomische Sinnhaftigkeit des Agri-PV Projekts in den verschiedenen Agri-PV Varianten zu vergleichen, wurde zunächst die rein photovoltaische Seite hinsichtlich Ertrags und Wirtschaftlichkeit simuliert und anschließend der Einfluss der landwirtschaftlichen Wertschöpfung und die Landnutzung entlang der DIN SPEC in die Betrachtung mitaufgenommen.

PV-Ertragssimulation

Die verschiedenen Anlagendesigns wurden bis auf die Varianten »UB-Flex-...« und »SBP-Track-AT...« mit der Software System Advisory Model (SAM) von NREL¹ simuliert. Alle Ergebnisse sind Durchschnittswerte der Simulationsdauer über 25 Jahre, wobei eine jährliche Leistungsminderung von 0,25 Prozent angenommen wird. Die Erträge der Varianten »UB-Flex-...« und »SBP-Track-AT...« wurden nach der SAM-Simulation in einem am WBI entwickelten Python-Skript manipuliert und zur Kostenrechnung wie-

¹ National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy

der in SAM-Formeltabellen zurückgespielt. Für den Aufbau der PV-Modelle ist folgendes anzumerken:

- Modulparameter entsprechen bezüglich des Transparenzgrades der Modulreihe BISOL Lumina
- Als Wechselrichter wurden SUNNY TRIPOWER CORE1 STP50 vorgesehen
- DC/AC Verhältnis von ~1,21 wurde gewählt

Die Systemkosten für die Varianten »UB-...« wurden aus Kostenaufstellungen für Agri-PV-Trackingsysteme im Obstbau (vier Meter Höhe, ~300 kWp), welche eine ähnliche Komplexität besitzen, abgeleitet und entsprechend der Leistung skaliert. Für die Unterkonstruktion wurden 406 €/kWp angesetzt. Die Wirtschaftlichkeit des Vorhabens ist von dieser Schätzung sehr abhängig – die Zahl entspricht in etwa den Unterkonstruktionskosten von großen Hochaufgeständerten Agri-PV-Systemen aus Schindele et al. (2020). Insbesondere die folgenden Punkte sind für die Kostenschätzung der »UB-...« Systeme interessant:

- Skalierung der Unterkonstruktionskosten auf drei Meter Höhe.
- Reduzierung der Unterkonstruktionskosten – entsprechend der statischen Belastung – um 50 Prozent (Franz Baumgartner, 2020).
- Reinigungskosten von 9 € pro Jahr und kWp wurden bei den Systemen, welche nicht einfahrbar sind, angesetzt. Bei den einfahrbaren Systemen »UB...« wurden die Reinigungskosten mit 500 € pro Jahr in OPEX berücksichtigt.
- Reduzierung der Installationskosten auf Werte von FFA zu 150 €/kWp (Schindele et al. 2020), da der Großteil der GCR-flexiblen Systeme werksseitig gefertigt werden kann

Die Kosten der Systeme »SBP-...« wurden ebenfalls anhand von bekannten Kosten aus stationären und Trackingsystemen im Obstbau abgeleitet. Für die stationäre Variante liegt eine systemspezifische erste Kostenschätzung von etwa 1.800 €/kWp vor, was ohne zugerechnete Genehmigungskosten einem Vergleich mit Systemen im Obstbau standhält.

Sonstige wichtige Punkte:

- Die Mehrwertsteuer wurde nicht hinzugerechnet und wird als durchlaufender Posten betrachtet.
- Bifazialität der Module werden Ertrags-seitig nur bei den Systemen mit einer GCR < 50 Prozent berücksichtigt.
- Verluste und Gewinne durch Einfahren bei Windlast und Schneefall werden vernachlässigt.
- Es gibt keinen Unterschied beider Genehmigungskosten zwischen den Systemen. Diese und die Netzanschlusskosten wurden anhand interner Informationen aus vergleichbaren Projekten geschätzt.
- Für die Module mit einer Transparenz > zehn Prozent wurden unabhängig vom Transparenzgrad dieselben Kosten veranschlagt – Kosten pro Wp für Module mit größerer Transparenz sind entsprechend höher. Diese Schätzung konnte in Kostenaufstellungen für Agri-PV-Systeme bestätigt werden.
- Eigenverbrauchsberechnung erfolgte auf Basis des skalierten Standardlastprofils L2 der BDEW (Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft, 2017), unter Abzug der simulierten PV-Leistung der Bestandsanlagen.
- Die Wetterdaten wurden Standortgenau genutzt (European Commission 2021).

Tabelle 18 Systemkostenvergleich der Agri-PV-Optionen am Standort Lindenbrunnenhof.

	UB-Fix	UB-Flex	UB-Flex-40	SBP-Fix	SBP-Track	SBP-Track-AT	SBP-Track-AT-45	Süd-Ref
Systemkosten [€]	358.563	358.563	608.315	122.749	443.799	443.799	443.799	255.280
Genehmigung [€]	58.538	58.538	58.538	58.538	58.538	58.538	58.538	58.538
Netzanschluss [€]	89.500	89.500	89.500	89.500	89.500	89.500	89.500	89.500
CAPEX gesamt [€]	506.602	506.602	748.633	498433	591.837	591.837	718.633	362.222
OPEX gesamt [€/Jahr]	4.032	4.032	6.059	5.519	6.623	6.623	8.515	8.024

In Tabelle 19 sind die finanziellen Parameter der Ertragssimulation abgebildet. Die Stromkosten für das Szenario A) «LBH als Betreiber » (Lindenbrunnenhof als selbsterzeugender Letztverbraucher) wurden der Stromrechnung von 2019 entnommen und als Einsparpotenzial bei Eigenverbrauch, abzüglich der 40 Prozent der EEG-Umlagen, zugrunde gelegt. Alle weiteren Parameter lehnen sich an Schindele et al. (2020) an. Die Stromkosten für die Ersparnisse am Eigenverbrauch eskalieren in der Simulation jährlich um ein Prozent. Beim Steuersatz wurden 30 Prozent angenommen. Für Szenario B) wird angenommen, dass der Strom durch den LBH abzüglich eingesparter Stromsteuer und Netzentgelte abgenommen werden kann. Die Flächenpacht wird in diesem Fall nicht beim Anlagenbetreiber/Stromlieferanten erhoben. In welchem Maß Agri-PV-Systeme ab 2022 durch die Innovationsausschreibungen eine Chance auf Förderung durch das EEG haben, ist bislang unklar. Bis zu einer Anlagengröße von 750 kWp haben Anlagenbauer einen gesetzlichen Anspruch auf eine Marktprämie im Rahmen des EEG, welche von der Bundesnetzagentur bestimmt wird. Da es sich bei den Anlagen-Optionen um Forschungsanlagen handelt und Entwicklungsbedarf besteht, ist eine Integration in die EEG-Innovationsausschreibungen unwahrscheinlich. Das heißt, dass ohne eine Förderung über Dritte keine wirtschaftliche Projektumsetzung möglich ist.

Tabelle 19 Finanzielle Parameter am Standort Lindenbrunnenhof (LBH).

	Strompreis [ct/kWh]	Ersparnis – EV [ct/kWh]	Verschuldung [%]	WACC [%]	Inflation [%]
A) LBH als Betreiber	5	23,04	80	4,1	2
B) LBH als Stromabnehmer	5	8,94	100	3,1	2

Zur Berechnung der Gestehungskosten in Tabelle 20 und für die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurde nur Szenario A) aus Tabelle 19 »LBH als Betreiber« berücksichtigt. Jahreserträge und Gestehungskosten wurden über 25 Jahre gemittelt.

Tabelle 20 Ergebnisse der Ertragssimulation – LBH als Betreiber.

	UB-Fix	UB-Flex	UB-Flex-40	SBP-Fix	SBP-Track	SBP-Track-AT	SBP-Track-AT-55	Süd-Referenz
kWh/Jahr	210.394,8	106.916,8	121.780,9	194.556,2	220.148,0	102.484,2	97.469,1	308.406,0
kWh/ Wachstumsperiode	178.553,9	85.197,5	89.520,5	166.477,7	184.901,8	78.217,6	67.358,1	250.017,5
kWh/ Wachstumsperiode*m ²	55,1	26,3	27,6	51,3	57,0	24,1	20,8	77,1
Spez. Ertrag [kWh/kWp]	982	484	329	881	997	464	343	1.038
EV [%]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,3
LCOE [ct/kWh]	14,6	28,9	31,4	16,1	16,7	36,3	38,16	8,47

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Aus der Betrachtung der verfügbaren PAR lassen sich landwirtschaftliche Erträge in Abhängigkeit der Verschattung abschätzen. Dies erfolgt auf Basis von PV-Simulationsergebnissen sowie auf Versuchsergebnissen und bekannten Korrelationen zwischenpflanzenbaulichen Erträgen und Verschattungsszenarien (Trommsdorff et al., 2021). Vereinfacht können Pflanzen hinsichtlich des Ertrages unter Verschattung in die drei Kategorien eingeteilt werden »Minus« für eine deutliche Ertragsreduzierung, »Zero« für konstanten Ertrag und »Plus« für eine merkliche Ertragssteigerung durch Verschattung. Der Standort Lindenbrunnenhof ist auf den Kartoffelanbau spezialisiert. Neben Kartoffeln sind unter der Agri-PV-Fläche auch Leguminosen, Winterweizen und ggf. Gemüse-Kulturen geplant.

PAR_effektiv in Tabelle 21 zeigt die durchschnittliche PAR Strahlung in der Wachstumsphase, welche primär durch die Flächenbelegungsrate (GCR) und die Modultransparenz und sekundär durch die GCR-Flexibilisierung erreicht wird.

Für die Berechnung der Landnutzungseffizienz (LER, vgl Kapitel 6.2) wird in Trommsdorff et al. (2021) ein Landverlust durch Aufständigung und Abspannung von 8,3 Prozent geschätzt. Wenn eine Abspannung benötigt wird, werden auf den nicht nutzbaaren Flächen Blühstreifen angelegt, welche wiederum positive Wirkung auf das Nützlings-Angebot und somit auf den Ertrag hat. Da anzunehmen und anzustreben ist, dass zukünftig Blühstreifen unter und neben Agri-PV-Anlagen über das Förderprogramm für Agrarumwelt, Klimaschutz und Tierwohl (FAKT) gefördert werden, muss dieser Flächenverlust im LER zukünftig nicht voll berücksichtigt werden. Der anzulegende Biodiversitätsstreifen würde ~7 Prozent der ehemaligen landwirtschaftlichen Nutzfläche auf dem Lindenbrunnenhof ausmachen und wird im Folgenden dementsprechend berücksichtigt.

Tabelle 21 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse.

	UB-Fix	UB-Flex	UB-Flex-40	SBP-Fix	SBP-Track	SBP-Track-AT	SBP-Track-AT-55
PAR_effektiv [%]	60	75	75	60	60	75	75
LER_minus	1,46	1,17	1,19	1,42	1,49	1,14	1,10
LER_zero	1,55	1,25	1,27	1,50	1,58	1,23	1,18
LER_plus	1,72	1,40	1,42	1,67	1,75	1,37	1,33
BMV_minus [%]	81,9	90,3	90,3	81,9	81,9	90,3	90,3
BMV_zero [%]	90,7	98,4	98,4	90,7	90,7	98,4	98,4
BMV_plus [%]	107,8	112,9	112,9	107,8	107,8	112,9	112,9
PPR_minus	0,77	0,73	1,83	0,88	1,80	1,68	1,68
PPR_zero	0,69	0,67	1,68	0,80	1,65	1,54	1,54
PPR_plus	0,58	0,58	1,47	0,67	1,36	1,34	1,34

Der Berechnung der PPR wurde ein standorttypischer Kartoffelertrag von 250 dt/ha zugrunde gelegt. Da die Kartoffeln auf dem Lindenbrunnenhof überwiegend direkt vermarktet werden, kann ein Preis von durchschnittlich 0,9 €/kg angesetzt werden. Bezogen auf die Agri-PV-Fläche von 3.243 m², wird eine Flächenleistung von 7.296,75 € für die PPR-Berechnung genutzt (Schindele et al. 2020). Die Tabelle 20 zeigt, dass je höher die GCR im Flexsystem ist (vgl. "UB-Flex" (GCR = 35 Prozent) und "UB-Flex-40" (GCR = 45 Prozent)), desto höher ist der Stromertrag pro Jahr. Da die Biomasseproduktion nicht beeinträchtigt wird, führt eine erhöhte GCR zu einer verbesserten LER (Tabelle 21). Die LER beider UB-Flex-Systeme übertreffen die LER-Werte des REF-Systems bei weitem, liegen aber unter denen eines fixierten UB-Systems. Wenn sich die gesamten Systemkosten pro kWp so skalieren wie angenommen, sind die Kosten für das System »UB-Flex-40« allerdings unverhältnismäßig höher, sodass die Wirtschaftlichkeit, gemessen am PPR, geringer ausfällt. Die Gestehungskosten (LCOE) in Tabelle 20 zeigen bereits dieses Verhältnis. Im Szenario »SBP-Track-AT-55« konnte durch die geringfügig höhere Flächenbelegungsrate nicht mehr Strom erzeugt werden als in »SBP-Track-AT«. Generell zeigen die Schätzungen, dass die Systemkosten für die Trackingssysteme zu hoch sind, um gute PPR-Indikatoren (< eins) zu erreichen.

Finale Systemdefinitionen für den Standort Lindenbrunnenhof

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse werden die Systemvarianten »UB-Flex« und »SBP-Track-AT« für den Standort Lindenbrunnenhof ausgewählt. Die Tracking-Variante »SBP-Track-AT« lässt die Optimierung zwischen landwirtschaftlicher Nutzung und Stromproduktion flexibel zu, was der Forschungstauglichkeit dient. Da das Projektrisiko bei dieser Systemvariante geringer ist, wird von der benachteiligten Wirtschaftlichkeit abgesehen. Dafür kann im Szenario »SBP-Track-AT« bei schlechtem Wetter reagiert werden, um den Krankheitsdruck zu mindern. Solche Effekte konnten in den bisherigen Simulationen nicht berücksichtigt werden.

Förderbedarf

Ein wirtschaftliches Projekt ergibt sich ohne Skalierungseffekte und ohne EEG-Förderung unter folgenden Förderbedingungen:

Tabelle 22 Förderbedarf der ausgewählten Varianten am Standort Lindenbrunnenhof.

	<i>UB-Flex</i>		<i>SBP-Track-AT</i>	
	[%]	[€]	[%]	[€]
Gesamteinnahmen über 5 Jahre		27.198		25.933
Restförderbedarf	85	499.565	83	599.019
Gesamteinnahmen über 10 Jahre		54.396		51.866
Restförderbedarf	84	492.529	84	606.202
Gesamteinnahmen über 15 Jahre		81.594		77.799
Restförderbedarf	83	485.493	85	613.385
Gesamteinnahmen über 20 Jahre		108.792		103.732
Förderbedarf (Standzeit 20 Jahre)	81	478.457	86	620.567
Gesamteinnahmen über 25 Jahre		135.990		129.665
Förderbedarf (Standzeit 25 Jahre)	80	471.421	87	627.750

Nachfolgende Tabelle 23 enthält die Gesamtaufistung der Projektvorkalkulation.

Tabelle 23 Kostenkalkulation des Projekts am Lindenbrunnenhof.

Teilprojekt Acker- und
Gemüsebau

	UB-Flex	SBP-Track-AT
PM	30	30
Personalkosten /Monat [€]	6.000	6.000
Personalkosten gesamt [€]	180.000	180.000
Materialkosten + Sachleistungen [€]	6.000	6.000
Reisekosten [€]	2.500	2.500
Förderquote [%]	70	70
Kosten APV-Prototyp [€]	587.248	724.299
Förderbedarf Prototyp [€]	478.457	620.567
Förderanteil Prototyp [%]	81	86
Gesamtkosten [€]	775.748	912.799
Förderquote gesamt [%]	79	82
Förderung [€]	610.407	752.517

6.6.2.4 Risikobewertung

Der Lindenbrunnenhof hat die Möglichkeit selbst als Betreiber und Bauherr der Anlage aufzutreten. Der Regionalverband Südlicher Oberrhein und die Gemeinde Forchheim stehen dem Projekt positiv gegenüber. Daher stellt der Erhalt der Baugenehmigung ein geringes Risiko da. Ebenfalls wird von einem geringen Risiko beim Erhalt der erforderlichen Gutachten (Umwelt-, Boden-, und Blendschutzgutachten, Windlastenprüfung) ausgegangen, da der Lindenbrunnenhof keine weiteren Auflagen hinsichtlich des Natur- oder Landschaftsschutzes aufweist.

Technische Projektrisiken sind vor allem in den Systemvarianten von UB zu erwarten, da solches System für den Agri-PV-Bereich zunächst entwickelt werden müssen – dagegen steht ein hoher Innovationsgrad mit entsprechenden technoökonomischen Potenzialen. Den Systemvarianten von sbp wird ein geringes technisches Risiko zugeordnet, obwohl sich ein Seilsystem mit Trackingmechanismus erst bewähren muss. Ob und welche der aufgeführten Anlagen gebaut werden kann, hängt vor allem davon ab, ob eine kostengünstige Finanzierung des Anlagenbaus über Drittmittel aus der Forschung oder Investitionsförderung o. ä. möglich ist.

6.7 Standort Heggelbach

6.7.1 Forschungskonzept und Innovationsgrad

Vor dem Bau der Anlage in Heggelbach 2016 wurde mit Hilfe von Strahlungssimulationen die optimale Ausrichtung und Moduldichte ermittelt. Um eine möglichst homogene Einstrahlung auf Pflanzenebene zu erreichen, wurde die Anlage mit einer Süd-West-Ausrichtung installiert (Fig. 27). Des Weiteren wurde in Absprache mit dem Landwirt das Ziel festgelegt, unter der Anlage mindestens 80 Prozent der landwirtschaftlichen Erträge der Referenzfläche zu erreichen. Aus diesem Grund wurden die Modulreihen mit einem Abstand von 6,3 Meter montiert. Für die Fundamente wurden vollständig rückbaufähige Spinnacker verwendet. Die Anlage hat eine Durchfahrtsbreite von fünf Metern und eine Durchfahrtsbreite von 19 Metern und ist damit für die meisten landwirtschaftlichen Maschinen geeignet. Für die PV-Module wurden bifaziale Module verwendet. Bifaziale Module sind in der Lage, auch auf der Modulrückseite Strom zu produzieren, zum Beispiel durch reflektiertes Licht. Außerdem bieten sie den Vorteil, dass mehr diffuse Strahlung auf Pflanzenebene verfügbar ist.



Fig. 27 Agri-PV-Anlage, Hofgemeinschaft Heggelbach, Herdwangen-Schönach (Foto: BayWa r.e.).

Um die aktuell vorliegende Bodenerosionsproblematik unter den Modulkanten zu lösen (Fig. 28), sollte die Anlage nachgerüstet werden, bevor weitere Forschungsprojekte durchgeführt werden. Hierfür wurde bereits die BayWa r.e. kontaktiert, die ein entsprechendes System entwickeln wird. Den anderen Standorten entsprechend wird unter der Anlage und auf dem Referenzfeld eine Fruchtfolge, bestehend aus Winterweizen, Kartoffel und Leguminosen, angebaut werden. Nach erfolgreicher Nachrüstung sollen in der Anlage der Hofgemeinschaft Heggelbach agrarwissenschaftliche Messungen durchgeführt werden (AP 7).

6.7.2 Machbarkeit

6.7.2.1 Organisatorische und zeitliche Machbarkeit

Zu AP 6.1: Nach aktuellem Stand ist noch unklar wie ein Regenauffangsystem an der Anlage in Heggelbach nachträglich aussehen und installiert werden kann, da leider keine diesbezüglichen Auskünfte der BayWa r.e. vorliegen. Die Befestigung eines solchen Systems direkt an den Solarpanelen könnte sich als schwierig erweisen, ggf. müsste eine Unterkonstruktion entwickelt werden. Aus diesem Grund kann aktuell keine zeitliche Einschätzung erfolgen, genauso wenig eine Einschätzung der Kosten.

Zu AP 6.2: Zur Dauer der Installation eines Regenauffangsystems liegen keine Informationen vor.

Teilprojekt Acker- und
Gemüsebau

Zu AP 7: In Heggelbach sind wie auf dem Lindenbrunnenhof und dem Ihinger Hof agrarwissenschaftliche Messungen geplant. Da die Anlage bereits installiert ist, kann direkt mit den Messungen begonnen werden. Es sollte aber berücksichtigt werden, dass die aktuell sehr ungleiche Regenverteilung die Messungen beeinflussen kann. Dafür ist ein Zeitrahmen von vier Monaten vorgesehen.



Fig. 28 Heterogene Wasserverteilung in der Agri-PV Anlage der Hofgemeinschaft Heggelbach, Mai 2021.

6.7.2.2 Technische Machbarkeit

Ein geeignetes Regenauffangsystem für die Agri-PV Anlage der Hofgemeinschaft Heggelbach wurde bis jetzt noch nicht entwickelt. Besonders die Fixierung stellt eine große Herausforderung dar, da die Unterkonstruktion dafür ursprünglich nicht ausgelegt wurde.

6.7.2.3 Wirtschaftliche Machbarkeit

Für die Hofgemeinschaft Heggelbach sind Personalkosten eingeplant, um den erhöhten Arbeitsaufwand in der Agri-PV-Anlage im Rahmen des Forschungsvorhabens zu decken. Die Kosten zur Nachrüstung der bestehenden Anlage sind noch nicht bekannt.

6.7.2.4 Risikobewertung

Da die Agri-PV-Anlage in Heggelbach bereits 2016 errichtet wurde, gibt es keine Risiken, die den Bau der Anlage gefährden könnten. Ob und wie eine Nachrüstung der Anlage überhaupt möglich ist, ist derzeit noch offen.

Teilprojekt Weinbau

Die Weinproduktion in den wärmsten Lagen Deutschlands leidet unter den steigenden Temperaturen im Zuge des Klimawandels. Seit 2003 hatten Weine bedingt durch die hohe Sonneneinstrahlung mehrfach Alkoholgehalte zwischen 14,0 und 15,5 Volumen-Prozent. Im Jahr 2018 mussten beispielsweise Spätburgundertrauben der wärmsten Lagen bereits Ende August geerntet werden, um die Alkoholgehalte zu begrenzen. Eine länger andauernde Reife bei tieferen Temperaturen im Herbst ist im Allgemeinen aber förderlich für die Weinqualität. Die Integration von Agri-PV-Anlagen in den Weinbau könnte durch die Beschattung eine Maßnahme zur Steigerung der Resilienz gegenüber dem Klimawandel darstellen. Eine Installation einer Agri-Photovoltaik Test- und Forschungsanlage im wärmsten Weinbaugebiet Baden kann das Potenzial von Agri-PV im Weinbau bei fortschreitendem Klimawandel gut beleuchten.

Photovoltaik im Weinbau erscheint bei der in Deutschland traditionell sehr licht- und wärmebedürftigen Kultur von Weinreben zuerst nicht intuitiv. Anders als in den großen europäischen Weinbauländern Frankreich, Italien und Spanien gedeihen Weinanlagen in Deutschland nicht in der Ebene, sondern auf Süd-exponierten Hängen, um die ideale Sonnenausrichtung auszunutzen. Dies hat den einfachen Grund, dass Deutschland in der Vergangenheit an der nördlichen Weinanbaugrenze lag und mit frischen mineralischen Weinen eine besondere Charakteristik besaß. Daher hat der Klimawandel für den Weinbau bisher auch viele positive Veränderungen gebracht und steigerte die Qualität deutscher Weine im Allgemeinen. Mittlerweile ist aber für viele Rebsorten und insbesondere für die ehemals besten Steillagen der Zenit überschritten und mit weiterhin steigenden Temperaturen entfernt sich das Klima immer weiter vom Ideal der vorherrschenden Sorten (Jones, 2007). Dies lässt Platz in der Lichtbedürftigkeit für Agri-PV-Anlagen und erlaubt das Nutzen potenzieller Synergien zwischen den beiden Systemen. Die lange Standzeit und feste Anlage von Weinkulturen passt sehr gut zu der möglichst langen Nutzungsdauer von Agri-PV-Anlagen mit mindestens 20 Jahren (Badelt et al., 2020).

Nicht nur die anfangs erwähnte verringerte Weinqualität aufgrund von höheren Alkoholgehalten ist eine Folge der verfrühten Zuckerreife. Durch die sich bei zunehmender Reife abbauende Beerenhaut wird die Traube deutlich anfälliger gegen opportunistische Pathogene wie *Botrytis cinerea* (Graufäule) und Essigbakterien (Essigfäule). Zusätzlich wird bei den vorherrschenden hohen Temperaturen ihre Entwicklung beschleunigt. Während *Botrytis* Infektionen im Anfangsstadium sogar positive Eigenschaften als Edelkäse haben können, entstehen bei zu weit fortgeschrittener Infektion deutliche Weinfehler. Weiterhin verschiebt sich das Befallsverhältnis bei höheren Temperaturen in Richtung Essigsäurebakterien oder sogar zu *Penicillium expansum* (Grün-/Speckfäule), welche beide bereits bei kleinem Befallsgrad deutliche Weinfehler hervorrufen (Dittrich, 1984; R. Fox LVVO Weinsberg, 2006).

In der Summe führt dies dazu, dass die Erntezeit in entsprechenden Jahren stark verkürzt ist. Alle Trauben müssen in kürzerer Zeit gelesen werden, um keine Ertrags- und/oder Qualitätsverluste zu riskieren. Dies sorgt für extreme Arbeitshöhepunkte in einer ohnehin sehr arbeitsintensiven Periode.

Eine höhere Temperatur bei gleichen Niederschlägen sorgt an sich schon für eine höhere Evapotranspiration. Da auch die Vegetationsperiode früher beginnt, kommt es zu mehr Aufwuchs, was den Wasserverbrauch zusätzlich angeregt. So entsteht während den Sommermonaten immer öfter ein Wasserdefizit. Moderater Trockenstress ist förderlich für die Weinqualität aber zu viel beeinflusst die Rebenentwicklung und den

Ertrag negativ. Außerdem wird der untypische Alterungston im Wein (UTA) gefördert. Eine Beschattung kann die Evapotranspiration und damit den Trockenstress verringern. Klimakapriolen und damit verbundene Ertrags- und Qualitätsschwankungen sind kein neues Phänomen und stellten schon immer ein großes Problem dar (Knoll, 2007). Man geht davon aus, dass die ältesten Schriftzeugnisse Schuldschreiben zwischen Bauern und Händlern sind, in welchen es sich darum dreht, zu welchem Preis die zukünftige Ernte abgegeben wird. In heutiger Bankenpraxis nichts Anderes als Futures (Herrmann, 2014). Die Abmilderung und/oder Absicherung solcher Jahresschwankungen stellt also schon lange ein Ziel in der landwirtschaftlichen Entwicklung dar. Mit dem Klimawandel nimmt die Häufigkeit und Stärke von Wetterereignissen zu und die Not an stetiger Produktion wird noch größer (Umweltbundesamt, 2021). Im Weinbau gibt es einige Klimakonstellationen, welche problematisch für Ertrag und Qualität der Ernte sind. Mit früheren Austriebsterminen sind die Triebe der Weinrebe über einen längeren Zeitraum Spätfrostgefährdet. Da das frische Grün bereits bei wenigen Grad unter null fatal geschädigt wird, sind bereits wenige Frostnächte, welche potenziell bis etwa Mitte Mai auftreten können, für die betroffenen Lagen verheerend. Da die Anlagen für die Weinblüten im Vorjahr festgelegt sind und bei den meisten Sorten die nachgetriebenen Triebe nicht sehr fruchtbar sind, bedeutet auch ein vermeintlich geringer Schaden an kleinen Knospen und Trieben bereits einen hohen Ertragsausfall (oftmals 50 - 70 Prozent). Die Kompensationsmöglichkeiten bei Verlust der Blüten sind sehr begrenzt (Li-Mallet et al., 2016). Eine bessere Horizontalabschirmung durch Agri-PV Anlagen könnte Spätfrost und auch den weniger problematischen Winterfrost abmildern.

Neben dem Verlust der Blüten durch Spätfrost können auch ungünstige Blühbedingungen den Ertrag beeinträchtigen. Zum einem kann es bei kühler Witterung zu einer hohen Rate an Verrieselung, d. h. Verlust der einzelnen Beeren eines Gescheins kommen, zum anderem wird durch sehr feuchtes Wetter die Pilzentwicklung gefördert. Infektionen mit den beiden Mehltauarten oder auch Botrytis an jungem Grün sind wahrscheinlich. Über Stiellähme können dabei weitere Gescheine verloren gehen. Weiterhin ist die Wachstumsphase nach der Blüte entscheidend für die Ausbildung der Gescheinsanlagen für das nächste Jahr. Der Einfluss dieser Periode auf den Ertrag des nächsten Jahres wird oft unterschätzt, besitzt aber laut Li-Mallet et al. (2016) einen Einfluss von 60 Prozent.

Hagel stellt ein hohes Risiko zu Beginn der Vegetationsperiode dar. Mit dem Klimawandel nimmt die Anzahl an Hagel-bringenden Hitzegewittern im Frühjahr und -sommer zu (Umweltbundesamt, 2021). Da es bis hin zum Totalausfall der Ernte kommen kann, nehmen sowohl Frost- und Hagelversicherungen als auch Hagelschutznetze stark zu. Insbesondere für Direktvermarkter, welche sich keine totalen Ausfälle erlauben können, ist eine Schutzmöglichkeit an risikoreichen Standorten entscheidend. Sonnenbrand stellt eine nicht zu unterschätzende Gefahr für Rebenwachstum und Ertrag dar. Durch starke Schwankungen von feucht, kühler Witterung zu trockenem und sehr heißen Phasen, welche insbesondere im Frühsommer häufiger beobachtet werden, wird dieses Phänomen gefördert. Es können sowohl die Blätter als Assimilat-Produzent, als auch die Trauben geschädigt werden.

7.1 Ziele

7.1.1 Gesamtziel des Vorhabens

Die generelle Machbarkeit von Photovoltaik in Kombination mit Weinbau soll techno-ökonomisch, bau- und naturschutzrechtlich sowie hinsichtlich der Akzeptanz in der Bevölkerung untersucht werden. Die symbiotische Doppelnutzung von Weinrebenflä-

chen kann maßgeblich dazu beitragen die zukünftige regionale Energieversorgung aus erneuerbaren Quellen zu sichern, während Landnutzungskonflikte weitgehend umgangen werden. Gleichzeitig kann der Weinbau durch die erhöhte Wertschöpfung auf der Fläche erhalten bleiben und dem wirtschaftlichen Druck standhalten.

Aus weinbaulicher Sicht hat eine Agri-PV Anlage zwei Hauptmerkmale, welche sich auf die Rebe auswirken: die Reduktion der Sonnenstrahlung und damit einhergehend die Veränderung der mikroklimatischen Bedingungen und die Schutzwirkung. Die Module beeinflussen die nötige Bewässerung und das Lichtmanagement und damit die Reife der Trauben. Eine Schutzwirkung wird in direkter Form für Hagel, Sonnenbrand und Sturm erwartet sowie indirekt durch Regenschutz und dem reduzierten Auftreten pilzlicher Pathogene.

Bezogen auf das Mikroklima soll untersucht werden, inwiefern die Verdunstung mit PV-Überdachung gemindert und die Bewässerungsnotwendigkeit der teilweise kargen Weinböden gesenkt werden kann. Die Installation von Tröpfchenbewässerungen ist im Rahmen der Umstrukturierung und Umstellung von Rebflächen (UuU) von der EU gefördert (MLR Baden-Württemberg, 2021). Durch die Beschattung mit Agri-PV-Anlagen könnte die Notwendigkeit für externe Bewässerung entfallen.

Aus anderen Versuchen ist bekannt, dass Beschattung die Assimilatproduktion negativ beeinflusst. Die durch früheren Austrieb gewonnene Mehrproduktion der Rebe könnte für die Reife der Beeren genutzt werden, ohne eine Überversorgung mit Assimilaten zu erzeugen. Auf diese Weise bräuchten die Beeren länger bis zur Vollreife und die vorher beschriebenen Probleme der verfrühten Reife bei hohen Temperaturen könnten umgangen werden. Die lokal prägenden Weinsorten, welche an ein gemäßigt kühleres Klima angepasst sind, könnten so ihre Sortentypizität erhalten.

Die grundlegenden Fragen zum Einfluss der Beleuchtungsintensität und dem Lichtbedarf der Rebe unter der Agri-PV Anlage sollen ebenfalls untersucht werden. Die photobiologischen Kenngrößen wie *Lichtkompensationspunkt* und *Lichtsättigungsplateau* sind entscheidende Maße zur idealen Einstellung der Modulführung. Aus weinbaulicher Sicht ist die Strahlungsintensität, welche über den Lichtsättigungspunkt hinausgeht, an die Agri-PV Anlage abzugeben. Diese überschüssige Energie verlangt der Pflanze nur zusätzliche Kompensation, z. B. eine gesteigerte Transpiration, ab. Eine Lichtreduktion kann, wie beschrieben, für eine Reifeverzögerung hilfreich sein. Eine Verschiebung des Erntezeitpunkts um ein bis zwei Wochen wäre sehr hilfreich, da die Traubenernte bei zu hohen Temperaturen eingestellt werden muss. Im Weinbau sind PV-Systeme interessant, welche sich an die Lichtbedürfnisse der Pflanzen mittels flexibler Modulbewegung (Tracking) anpassen lassen. Die Bildung spezieller sekundärer Metabolite durch intensive Beleuchtung wird durch die Beschattung beeinflusst und ihre Untersuchung ist ebenso Ziel.

Eine 100-Prozentige Schutzfunktion durch die Agri-PV Anlage gegen Unwetter ist nicht zu erwarten, aber eine deutliche Abmilderung des Schadens ist wahrscheinlich. Nach Hagelereignissen soll eine Schadensbonitur Aufschluss über die Schutzwirkung und ideale Schutzhaltung, bspw. mit Modulstellung senkrecht zur Wind- bzw. Wetterrichtung, geben. Hagelschutznetze, die ca. 20 Prozent des Lichts streuen, sind nicht nur gegen Hagel wirksam, sondern bieten auch Schutz vor Sonnenbrand. PV-Module blockieren die Sonne nicht so gleichmäßig wie Hagelnetze, sollten aber die Schwankungen zwischen feucht-kaltem und trocken-heißem Mikroklima stark genug abmildern, um auch vor Sonnenbrand wirksam zu schützen. Eine Einschätzung der Schutzfunktion ist mit den geplanten Versuchsanlagen möglich.

Agri-PV-Anlagen werden auch die Temperaturentwicklung beeinflussen. Die Spätfrostgefahr nimmt allgemein mit guter Horizontabschirmung ab, eine windberuhigte Stelle ist wiederum anfällig für Strahlungsfrost. Eine Abschirmung puffert zudem die tägli-

chen Temperaturschwankungen im Sommer. Die tatsächliche Auswirkung ist schwer vorauszusagen, aber eine verbesserte Situation bei Frostschäden scheint wahrscheinlich. Ob sich ein Wärmestau in der Anlage im Sommer entwickelt und ob die Luftfeuchtigkeit durch die vermutlich verringerte Belüftung erhöht, soll untersucht werden. Eine weitere Herausforderung ist im Weinbau die Entwicklung alternativer Anbaumethoden, um den Pflanzenschutzmitteleinsatz zu reduzieren. Im TP Weinbau soll mit der PV-Überdachung der Einsatz von Fungiziden gegen nässeabhängige Pilzkrankheiten wie *Peronospora*, *Oidium* und *Botrytis* reduziert werden können. Inwiefern eine wetterabhängige Modulführung dies weiter verbessern kann, ist eine fortführende Fragestellung. Ob eine verringerte Belüftung unter der PV-Anlage die lokale Luftfeuchtigkeit erhöht und so einen negativen Effekt hat, ist ebenfalls relevant.

Eine Abmilderung extremer Umwelteinflüsse würde den Weinanbau erleichtern und die Weinqualitäten verbessern. Ebenso würde eine Kontrolle über den teilweise erwünschten moderaten Stress der Weinreben besondere Weinqualitäten ermöglichen. Ob es möglich ist, mit einer Agri-PV-Anlage höhere Erträge besserer Qualität zu erzielen, kann aber erst nach einigen Versuchsjahren beantwortet werden.

Die Implementierung von Agri-PV-Anlagen in Hanglagen stellt eine technische Herausforderung dar. Daher ist es ein zentrales Ziel des Projekts kostengünstige und ressourcenschonende Konstruktionen zu entwickeln. Im Rahmen der Arbeiten können Handlungsempfehlungen zu Systemdesign und Umsetzungen in den Weinbergen für Legislatur und Weinbaupraxis abgeleitet werden.

7.1.2

Beschreibung & Ziele aller Projektpartner

7.1.2.1

Staatliches Weinbauinstitut Freiburg (WBI)

Das Staatliche Weinbauinstitut Freiburg (WBI), welches 1920 gegründet wurde, ist eine Einrichtung des Ministeriums für Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR) und zählt die praxisorientierte Forschung in Weinbau und Oenologie zu seinen zentralen Aufgaben. Kernziele der Forschungsarbeit liegen mitunter in der Entwicklung und Prüfung neuer Verfahren im Weinbau, dem Rebschutz, sowie der Analytik. Verschiedene Referate am WBI bündeln Kompetenzen rund um den Weinbau und aufbauender Wertschöpfungsketten. Erste Vorarbeiten zur Umsetzung von Agri-PV im Weinbau haben bereits 2017 zusammen mit dem Fraunhofer ISE stattgefunden. Mit dem Gutsbetrieb Staatsweingut Freiburg am Blankenhornsberg kann das WBI auf einem eigenen Forschungsbetrieb mit entsprechend hochwertigen Weinrebenflächen zurückgreifen. Das WBI und insbesondere der Gutsbetrieb Staatsweingut Freiburg ist daher als Agri-Photovoltaik-Standort im Rahmen eines Forschungsprojekts prädestiniert.

7.1.2.2

Christoph Vollmer

Christoph Vollmer ist Eigentümer der Weinbaufläche im Salmengrund in Oberkirch – Bottenau. Die angebauten Trauben *Traminer* und *Riesling* werden über die Winzergenossenschaft Oberkirch angebaut und vermarktet. Christoph Vollmer ist Ingenieur und Eigentümer der Fa. Intech GmbH & Co KG. Im Nebenberuf betreibt er einen Bauernhof in Oberkirch-Bottenau mit ca. zehn Hektar. Weinbau ist in der Familie Vollmer Tradition. Der von Christoph Vollmer betriebene Hof ist mit einer kurzen Unterbrechung seit über 300 Jahren weinbaulich genutzt und von Generation zu Generation weitergegeben. Heute ist der Hof mit 2,5 Hektar Weinbaufläche, fünf Hektar Wald und drei Hektar Wiesen nicht mehr als Haupterwerbsbetrieb lebensfähig. Ohne zusätzliche Einkom-

mensquellen ist auch die Fortführung als Nebenerwerbsbetrieb in Frage gestellt. Das übergeordnete Ziel des Antragstellers ist die Doppelnutzung der Fläche für die landwirtschaftliche Produktion wie auch die Erzeugung von PV-Strom. Damit soll die Traubenqualität wie auch der wirtschaftliche Ertrag der Fläche gesteigert werden. Da es sich um eine Steillage handelt, ist dies auch eine Möglichkeit diese Rebfläche zukünftig zu erhalten, da aus arbeitstechnischer Sicht die Bewirtschaftung von Steillagen in naher Zukunft nicht mehr möglich sein wird.

7.1.2.3 Stadt Vogtsburg

Die Stadt besitzt nennenswerte kommunale Rebflächen. Sie lässt ein Strukturgutachten erstellen mit dem Ziel, die bestehende Wasserversorgungsinfrastruktur fit für die Zukunft zu machen. Die Stadt betreibt ein umfangreiches Tourismusmarketing. Mit der Realisierung des seinerzeit größten Solarparks Baden-Württembergs in überwiegend genossenschaftlichem Besitz haben die Stadt Vogtsburg und ihre Bürgerschaft ihre Innovationsbereitschaft und -fähigkeit bewiesen.

7.1.2.4 Fa Intech

Die Fa. Intech wurde im Jahr 2000 von Herrn Hansjörg Vollmer gegründet und im Jahre 2015 von Herrn Christoph Vollmer übernommen. Seit 2005 baut die Firma Solaranlagen, zunächst als Dachanlagen, dann seit 2013 als Freilandanlagen, aufgeständert oder schwimmend. Die Fa. ist bekannt für Inselsysteme (netzferne PV-Anlagen mit Backup-Generator), insbesondere für landwirtschaftliche Betriebe. Die Anlagen werden in Kehl-Auenheim aufgebaut und weltweit vertrieben. Außerdem baut Intech Ladestationen und Speichersysteme. Seit 2012 werden Solartracker vertrieben. Die Weiterentwicklung des vorhandenen Solartrackers zum Agri-PV Weinbau ist die Fortsetzung der bisherigen Entwicklung. Hierbei kommen die Weinbaulichen Kenntnisse aus dem aktiven Betrieb der Nebenerwerbslandwirtschaft mit den Erfahrungen aus neun Jahren Trackerentwicklung (Konstruktion und Steuerungstechnik) zusammen. Bei Intech liegen 21 Jahre Projekterfahrung vor. In dieser Zeit wurden zahlreiche Innovationen hervorgebracht. Neben Solaranlagen befinden sich auch solar betriebene Wasserpumpensysteme und Ladesysteme für E-Fahrzeuge im Spektrum. Die Erschließung des Geschäftsfeldes Agri-PV mit Spaliertechnik (fest montierte- oder Tracking-Anlagen) ist fester Bestandteil der strategischen Ausrichtung.

Im Jahr 2013 wurde in einem gartenbaulichen Versuch Tomaten unter einem Intech Solartracker gezogen. Im Vergleich zu einer ebenfalls abgedeckten Tomatenkultur waren keine Unterschiede erkennbar.

7.1.2.5 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (Fraunhofer ISE)

Siehe Kapitel 3.1.2.6.

7.1.3 Projektkoordination und Arbeitspakete

Im Rahmen des TP Weinbau werden drei Agri-PV Anlagen an drei unterschiedlichen Standorten untersucht (Tabelle 24). Die Projektkoordination (AP 1) wird vom Staatlichen Weinbauinstitut Freiburg übernommen. Bei den Forschungsarbeiten (AP 3) liegt der Schwerpunkt auf der Agri-PV-Anlage des WBI, Staatsweingut Freiburg in Blankenhornsberg. Die Arbeitspakete werden in dem Kapiteln 7.4.2.1 beschrieben. Die beiden Praxisstandorte sind mit geringerer Forschungsintensität in die Begleitforschung einbezogen. Details sind den Standortbeschreibungen zu entnehmen.

Tabelle 24 Übersicht über die Standorte Blankenhornsberg (Staatsweingut Freiburg), Oberkirch-Bottenau und Vogtsburg.

	Blankenhornsberg	Oberkirch-Bottenau	Vogtsburg
Bewirtschaftung	WBI, konventionell	Konventionell	<i>unbekannt</i>
Betrieb	Forschungsbetrieb	Praxisbetrieb	Praxisbetrieb
Kultur	Spätburgunder	Riesling / Traminer	<i>unbekannt</i>
Anlagendesign	Südausrichtung/ Tracking	Südausrichtung Fix	<i>unbekannt</i>
Anlagengröße	171 kWp	400 kWp	128 kWp

7.2

Stand der Wissenschaft und Technik und bisherige Arbeiten

Die Nettophotosynthese (CO_2 -Aufnahme $>$ CO_2 -Abgabe) steigt mit zunehmendem Angebot an photosynthetisch aktiver Strahlung (PAR) bis zu einem Sättigungsniveau an. Faktoren wie limitierte CO_2 -Verfügbarkeit, Temperatur und Wasserversorgung können das kulturspezifische Sättigungsniveau jedoch verschieben. Aus verschiedenen Quellen wird in Currie (1983) zusammengetragen, dass das Sättigungsniveau bei 20.000 bis 35.000 bzw. ab 66.000 lx erreicht ist. In Cho et al. (2020) wird von einer Sättigung bei 30.000 bis 40.000 lx ausgegangen. Im Durchschnitt kann mit einem Sättigungsniveau von 40.000 lx gerechnet werden – das entspricht etwa 160 W/m^2 PAR (320 W/m^2 Solarstrahlung).

Cho et al. (2020) berichten, dass in Korea mit einer Verschattung von 30 Prozent eine Reifeverzögerung der Weinreben *Campbell Early* von zehn Tagen herbeigeführt wird. Über die spezifizierte Wachstumsphase von April bis September wurden den Weinreben auf Grund der Beschattung nur ~50 Prozent der notwendigen PAR angeboten. Trotz der Verzögerung konnte der gleiche Zuckergehalt wie in der Referenz erreicht werden. Es wird berichtet, dass die Bodentemperatur unter dem Agri-PV-System in der Austriebszeit (April) etwa zwei Kelvin höher war als in der Vergleichsparzelle, was den Austrieb trotz Verschattung um ein bis zwei Tage verfrühte. Es ist anzumerken, dass im Hochpunkt an einem Maitag am Versuchsstandort durchschnittlich nur 98 W/m^2 (49 W/m^2 PAR) Solarstrahlung erreicht wurden. Der Mai am Standort Staatsweingut Freiburg liefert, gemittelt von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang, etwa 386 W/m^2 Solarstrahlung bzw. 193 W/m^2 PAR (European Commission, 2021). Es ist daher unklar inwiefern sich die Ergebnisse auf lokales Klima und entsprechende Rebsorten übertragen lassen.

Eine Studie mit Weinreben in Agri-PV-Systemen in Indien, Nagpur (Malu et al., 2017) bewertete Weinreben als schattenintolerant, da sie für gesundes Wachstum sieben bis acht Stunden direktes Sonnenlicht benötigen. Agri-PV-Systeme, welche die Reben kaum verschatten, wurden dahingehend entwickelt. Das wurde erreicht, indem die PV-Module zwischen die Reihen installiert wurden.

Bekanntere Projekte von Sun 'Agri zu Agri-PV im Weinbau (Rollet, 2021) zeigen innovative technische Umsetzungen von entsprechenden Agri-PV-Systemen, welche mehrere Weinrebenreihen überspannen und mit Tracking-Systemen versehen sind (vgl. Fig. 29).

Ein spezieller Trackingalgorithmus steuert die Modulbewegung so, dass Witterungseinflüssen wie Hagel, Regen, Frost, Wind, Hitze/hohe Direktstrahlung, etc. möglichst entgegengewirkt wird. Versuchsergebnisse sind spärlich verfügbar und deuten auf Verdunstungsminderung (-12 bis -34 Prozent), höherer Säuregehalte (plus 9 bis 14 Prozent) und mehr Farbpigmente (plus 13 Prozent), was eine bessere Ausfärbung bedeutet, hin.



Fig. 29 Sun' Agri Agri-PV-System über Weinreben im Drahtrahmenanbausystem (Rollet, 2021).

Whailex Schutznetze waren in den letzten Jahren Objekte intensiver Untersuchungen am WBI (Littek et al., 2012). Sie schützen effektiv vor Hagel und Sonnenbrand und sind daher besonders in Gegenden mit hohem Hagelaufkommen, wie am Bodensee oder der Ortenau, häufiger anzutreffen. Im Obstbau gibt es zumeist Überzeilenabschirmungen, während die Netze im Weinbau an den Reihenseiten angebracht sind. In beiden Bauarten ist eine Lichtverringerng durch Streuung am Netz um ca. 20 Prozent beschrieben (Handsack, 2013; Littek et al., 2011). Da im Weinbau etwa ein Drittel der Trieb länge über die Netze ragt, kann das verringerte Lichtangebot teilweise kompensiert werden. Die Untersuchungen am WBI ergaben für die klassischen schwarzen Hagelschutznetze in Whailex Seitenabspannung keine wuchshemmenden Einflüsse. Obwohl die gemessenen Temperaturen in der Laubwand um etwa 0,5 Kelvin geringer als auf der Referenz waren, war der Einfluss auf Austrieb und Entwicklung vernachlässigbar. In Kombination mit einem starken Spätfrostereignis wurde unter einem dichteren Netztyp (~30 Prozent Beleuchtungsverlust) eine schnellere Entwicklung im Frühjahr beobachtet (Klodt, 2021b). Eine erhöhte Krankheitsanfälligkeit unter Netzen wurde nicht festgestellt, ebenso kein relevanter Einfluss auf die Weinqualität. Die Beschattung durch die Netze mit 20 Prozent weniger Licht mit gleichzeitigem Ausgleich durch die oben freistehenden Triebe scheint durch die Rebe ohne Probleme akzeptabel zu sein. Inwiefern eine Beschattung auch einen geringeren Wasserverbrauch der Kulturen hervorruft, ist noch nicht geklärt erscheint aber wahrscheinlich. Eine geringere Assimilationsleistung bedingt auch weniger Wasser als Edukt, sowie Wasserverlust beim Gasaustausch. Weiterhin werden nicht nur die Reben, sondern auch der Boden beschattet und auch dort dürfte sich eine geringere Transpiration auswirken.

Neben den Untersuchungen zu Hagelschutznetzen läuft am WBI ein Versuch mit verringerten Laubwandhöhen. Dabei wird die gängige Laubwandhöhe von 130 Zentimeter auf 80 bzw. 50 Zentimeter verringert. Der Grundgedanke dahinter ist, dass die kleinere Laubwand weniger Assimilate produzieren kann und daher die Weinbeeren leicht unterversorgt werden, so dass die durch früheren Austrieb gewonnene Mehrproduktion für die Reife der Beeren genutzt werden kann, ohne eine Überversorgung mit Assimilaten zu erzeugen. Auf diese Weise bräuchten die Beeren länger bis zur Vollreife und die vorher beschriebenen Probleme der Reife bei hohen Temperaturen könnten umgangen werden. Die vorläufigen Versuchsergebnisse bestätigen diese Tendenz (Klodt, 2021a).

Eine Beschattung durch Agri-PV könnte die Assimilatproduktion in ähnlicher Weise beeinflussen und so ebenso eine Reifeverzögerung hervorrufen.

7.3 Potenzialanalyse

(1,6 Prozent, 28.000 Hektar (Statistisches Landesamt Baden-Württemberg)). Die Tendenz der Flächenentwicklung ist aber sinkend. Weinmarkt und Klimawandel erhöhen den Druck auf die Winzer, so dass Handlungsbedarf besteht. Die Landdoppelnutzung ermöglicht ökonomische und technische Synergien, sodass Ertrags- und Einkommenschwankungen stabilisiert werden könnten. Weitere Ausführungen zu den pflanzenbaulichen Potenzialen wurden einleitend in 7.1.1 beschrieben.

Die für den Weinbau genutzte Fläche ist nur teilweise für Agri-PV geeignet. Nur die Flächen, die eine Steigung unter 30 Prozent (21.000 ha, (MLR Baden-Württemberg, 2021)) aufweisen, sind nach derzeitigem technischen Stand auch wirtschaftlich. Dennoch soll Agri-PV anhand des Standortes Oberkirch-Bottenau in Steillagen wissenschaftlich untersucht werden, um das Potenzial dieser Lagen zu erörtern. Steile, heiße Südlagen sind in Baden-Württemberg häufig brachliegend – gut bewirtschaftbare Flachlagen und kühlere Lagen werden weinbaulich betrieben (Klimawandel). Aus Sicht vom WBI, der Winzer und der Gesellschaft sind steile Weinlagen, nicht zuletzt wegen des spezifischen Weinbauökosystems, zu erhalten wie die Steillagenförderung zeigt (Strub, 2021) – hier kann auch die Agri-PV helfen.

Der Anteil davon an Süd-ausgerichteten bzw. flachen Lagen dürfte nach eigenen Schätzungen deutlich über 50 Prozent sein (WBI, 2021). Somit ergibt sich ein flächenspezifisches Agri-PV Potenzial im Weinbau von etwa 0,61 Prozent der landwirtschaftlichen Fläche Baden-Württembergs. Für Dauerkulturen wie Weinreben wird in Leitfaden des Fraunhofer ISE ein Flächenleistung von 700 kWp/ha abgeschätzt (Fraunhofer ISE, 2020). Dies entspricht einem leistungsspezifischen Agri-PV Potenzial von 7,35 GWp. Der Energieertrag entspräche etwa 7,35 TWh also etwa 12,8 Prozent der Bruttostromerzeugung und 40,2 Prozent der Stromproduktion durch erneuerbare Energien in 2019 (UM Baden-Württemberg).

Wissenschaftlich- und wirtschaftliche Erfolgsaussichten bestehen außerdem in der Weiterentwicklung des umfangreichen Vorhersagemodells für den Weinbau *Vitimeteo* (Staatliches Weinbauinstitut Freiburg, 2021). Dieses wird derzeit genutzt, um möglichst vorausschauend den pflanzenbaulichen Herausforderungen entgegenzutreten. Die Infrastruktur der Agri-PV Anlage kann mittels Datenerhebungen, Systemanalyse und pflanzenbaulicher Forschung für das Modell genutzt werden, um Steuerungsempfehlungen für die Modulnachführung anzubieten. Potenzielle Ergebnisse sind ideale Tracker-Profile für einen Kompromiss aus Stromerzeugung und Pflanzenwachstums, Modelle von *Vitimeteo* zur Rebenentwicklung um den Faktor Verschattung ergänzen, Potenziale zur Pflanzenschutzersparung frühzeitig erkennen und durch spezielle Tracker-Profile maximieren (waagrecht für Regenschutz, maximale Belichtung bei Blattnässe, stärkere Beschattung bei zu viel Sonne, etc.).

7.4 Standort Blankenhornsberg

7.4.1 Forschungskonzept und Innovationsgrad

Um in weniger sonnigen Jahren eine ausreichende Lichtverfügbarkeit für die Rebstöcke zu gewährleisten, sollen am Standort Staatsweingut Freiburg nachgeführte PV-Module erprobt werden, welche die Lichtverhältnisse unter den Modulen in entscheidenden Phasen des Pflanzenwachstums optimal an die Anforderungen des Weinbaus anpassen. Mit den geführten Modulen können außerdem spezielle Verschattungsprofile eingestellt werden, um die Wirkung von Agri-PV im Weinbau weiträumig zu erforschen. Für die Installation der Forschungsanlage stehen am WBI zwei Flächen zur Verfügung (siehe Fig. 30). Im Laufe der Vorstudie wurden beide Standorte erörtert. Letztendlich wurde die Flächenoption 2 ausgewählt, welche ein Gefälle von unter 15 Prozent nach Westen und eine Größe von etwa 5.233 m² aufweist und entsprechend eine Agri-PV-Systemfläche von 2.627 m² ermöglicht. Gefälle und Hanglage führen zu einem kürzeren Tagesverlauf, da die Sonne morgens durch den Berg am östlichen Flächenende verdeckt wird. Das ist am Helligkeitsunterschied der Flächen-Opt. 1 (rechter Bildbereich, heller) und Flächen-Opt. 2 (linker Bildbereich, dunkler) erkennbar.

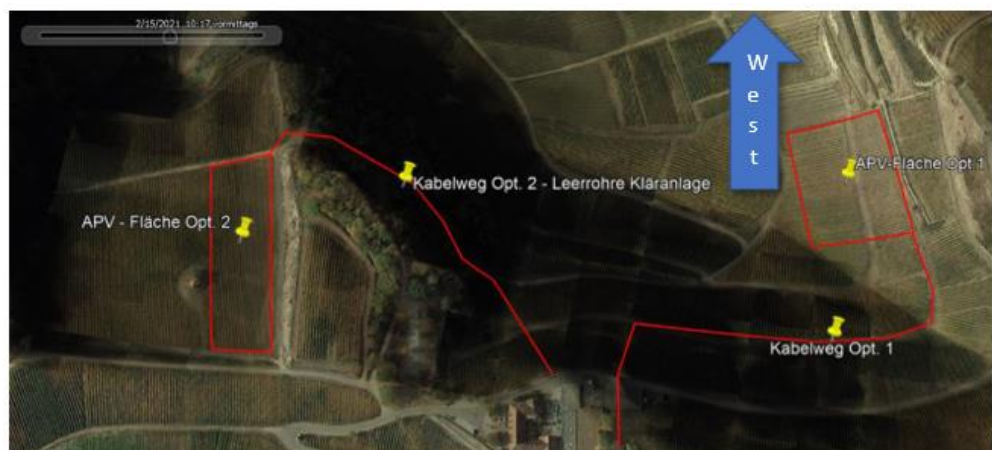


Fig. 30 Standortoptionen für Agri-PV-Systeme am Staatsweingut Freiburg – Blankenhornsberg; Schattensimulation vom 15.02.2021 um 10:17 Uhr.

Damit Inhomogenitäten über der Versuchsfläche, welche durch die Gefälleeigenschaft und einer früheren Planierung der Fläche verursacht sein können, statistisch bestmöglich mitberücksichtigt werden, sollen sich der Agri-PV-Überdachungsstreifen (APV) mit dem Referenzstreifen (REF) abwechseln (Fig. 31). Mindestens vier Referenzen und Behandlungen sollen auf der Fläche Platz finden – je mehr desto besser. Lichtsimulationen sollen im Voraus den Kernbereich der Streifen mit möglichst homogenen mikroklimatischen Verhältnisse identifizieren und damit eine sinnvolle Anzahl an Parzellen festlegen. Der typische skelettreiche, schwarze Vulkanverwitterungsboden bringt hohe Verdunstungsraten mit sich. Das schwarze Gestein spendet den Reben durch die Speicherwirkung lange Wärme. Geologisch gehört die VDP.GROSSE LAGE® zur Einzellage Ihringer Winklerberg im Kaiserstuhl (VDP, 2020). Für eine geprüfte Statik der Anlage sind im Projektverlauf Bodengutachten und Zugproben notwendig.



Fig. 31 Agri-PV-System-Platzierung auf der Versuchsfläche.

Aufgrund des geringeren Gefälles auf der angedachten Fläche bietet sich die Installation einer Reihentracking-Anlage an. Die Firma Intech bietet entsprechende Tracking-Systeme, welche für Agri-PV-Anwendungen geeignet sind, an und hat diese bereits in eigenen Versuchen getestet. Auf Basis eines technischen Anforderungskatalogs, in dem pflanzenbauliche- und solartechnische Randbedingungen abgeglichen sind (Anhang A, Tabelle A 2) wurde zunächst mit der Firma IndustrialSolar über ein mögliches Anlagenkonzept nachgedacht. Am Beispiel der Agri-PV-Systeme von Sun' Agri (Rollet, 2021) wurde ein System vorgesehen, welches mehrere Weinrebenreihen überspannt.

Im Verlauf der Vorstudie wurde sich für das System der Firma Intech entschieden, welches die angedachten Hauptfunktionen *Reifeverzögerung* und *Verdunstungsminderung* abgedeckt, ohne jede Weinrebenreihe mit PV-Modulen zu überdachen (vgl. Fig. 33). Im Gegensatz zur völligen Überdachung, kann so erheblich Material eingespart und der CO₂-Fußabdruck gesenkt werden. Weiterhin ist davon auszugehen, dass die Akzeptanz in der Bevölkerung bei einer niedrigeren und offeneren Bauweise höher ist als bei komplett überspannten Systemen. Der Streifen-Parzellen-Charakter der angedachten Agri-PV-Platzierung auf der Fläche (Fig. 31) lässt sich mit den freistehenden Systemen ebenfalls einfach umsetzen, da Bereiche ohne Module nicht überspannt werden müssten. Bei diesem Trackingsystem kann das Spalier für die Pflanzenkultur (Weinrebe) sowohl als Haltesystem für die Reben als auch als reine Unterkonstruktion für die Solarmodule genutzt werden. Am Standort Staatsweingut Freiburg soll die Solarreihe für manuelle Bearbeitung zusätzlich bepflanzt werden, sofern dies die technischen Randbedingungen zulassen (siehe Kapitel 7.4.2.2, Agri-PV System Konzept). Trotz der geringen Bauhöhe von drei Metern kann eine mechanische Bearbeitung der Weinparzellen mit Laubschneider und Vollernter stattfinden. Auf einem Drittel der Fläche kann die Bearbeitung nur reduziert stattfinden, da in jeder dritten Rebzeile das freistehende Agri-PV-System installiert ist. Die Modultische können für den Einsatz von Maschinen mittels der Trackingmechanik weggeklappt werden. Ein Neigungswinkel von mindestens +/- 60° ist hierfür ausreichend. Da die Rebzeilen von Osten nach Westen verlaufen (siehe Fig. 30), resultiert eine Südausrichtung der Agri-PV-Anlage.

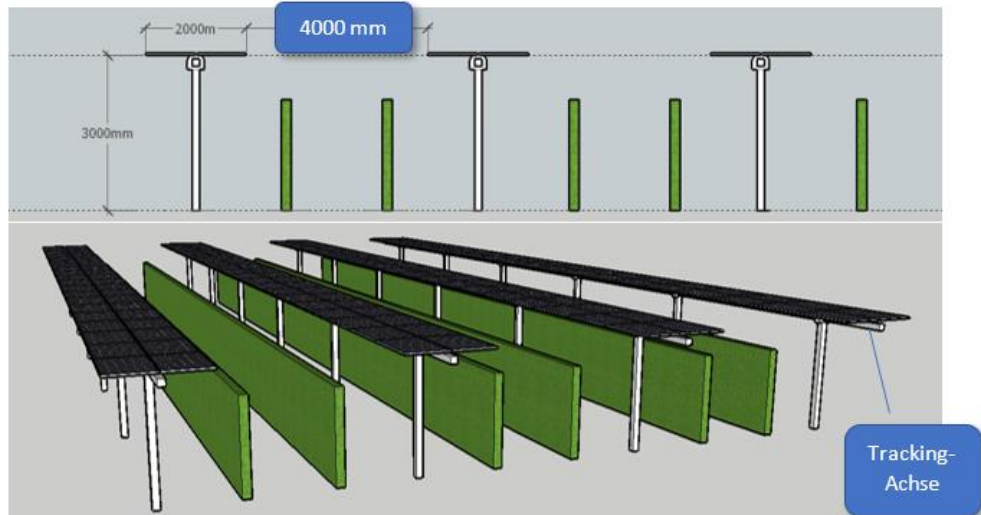


Fig. 32 Illustration des Intech-Reihentrackingsystems für Agri-PV im Weinbau.

Für ein gezieltes Lichtmanagement kann der Trackingalgorithmus, der für den maximalen Energieertrag der Sonne folgt, manipuliert werden. Die Antitrackingfunktionalität ist näher in den Kapiteln 1.1 »Ausblick« und 3.5.2.2 »Systemfunktionalität« beschrieben.

Fig. 33 zeigt den elektrischen Ertragsverlust (unten), sowie die erhöhte PAR-Strahlung auf Pflanzenlevel (oben), die durch Antitracking-Systeme im Vergleich zum Tracking erreicht werden. Eine Detaillierte Beschreibung der Graphik ist ebenfalls in Kapitel 3.5.2.2 »Systemfunktionalität« zu finden.

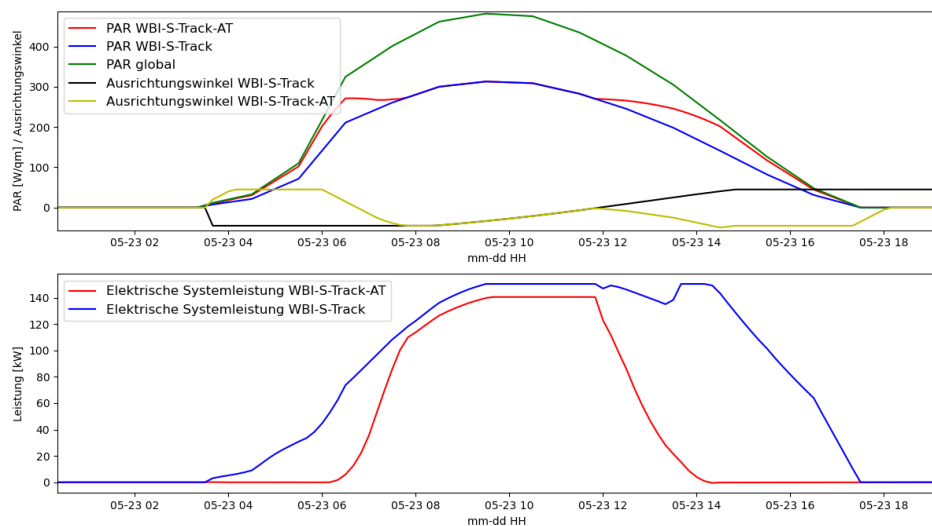


Fig. 33 Oben: Simulierte Ausrichtungswinkel der Varianten "WBI-S-Track-AT" und »WBI-S-Track«, sowie simulierte PAR-Levels auf Pflanzenebene je nach System; Unten: Leistungsverlauf der verschiedenen Systeme.

Im Rahmen der Vorstudie wurde in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE eine Analyse des gegenwärtigen und zukünftigen Energiesystems durchgeführt. Ziel war die zukünftigen Eigenverbrauchsszenarien abzuschätzen und Potenziale für zusätzliche Energiespeicherung aufzuzeigen. Ein wichtiges Ergebnis der Überlegungen ist die enorme Pufferspeicherfähigkeit des Weinlagers. Bei den derzeitigen Weinkapazitäten von ~226.500 Litern Wein können durch eine Pufferung der Kälteleistung tagsüber, bei Sonnenschein (PV-Strom) ~140 kWh thermische Energie in Form von entzogener Wärmemenge im Wein gespeichert werden. Hierfür müsste die Temperatur des Weins um +/- 0,3 Kelvin gepuffert werden. D. h. nachts würde der Wein um 0,7 Kelvin wärmer werden – tagsüber würde er mit PV-Energie wieder um 0,7 Kelvin (0,3 K tiefer als üblich) heruntergekühlt werden. Aus Sicht der Kellerei am Staatsweingut sind die Auswirkungen auf die Weinqualität dabei zu vernachlässigen. Wird eine Leistungszahl von zwei für die Kompressionskältemaschinen angesetzt so ergibt sich eine Speichermöglichkeit von 70 kWh PV-Energie, allein durch aktives Energiemanagement der Weinkühlung. Der Eigenverbrauchsanteil könnte dabei um ~8 Prozent (absolut) gesteigert werden. Alternativ oder zusätzlich wäre ein Kältepufferspeicher, z. B. mit dem Phasenwechselmaterial Paraffin, wirtschaftlich integrierbar. Auch ein Batteriespeicher wäre denkbar, um zusätzlich die Spitzenlast zu reduzieren. Bei zusätzlicher Speicherkapazität von 90 kWh elektrischer Energie zum Energiemanagement würde der Eigenverbrauchsanteil im Status Quo um absolute 16 Prozent gesteigert werden. In einer Schätzung für zukünftige E-Mobilität am Staatsweingut Freiburg wurden zwei Oberklassen und zwei Kompaktwagen simuliert, welche jährlich 21.900 bzw. 10.450 kWh verbrauchen. Für die Ladung wurde eine zusätzliche Speicherkapazität von 90 kWh (Batteriespeicher) vorgesehen. Das Ergebnis zeigt eine Eigenverbrauchserhöhung um absolute ~26 Prozent. Unabhängig von den bisher genannten Potenzialen unterliegt das Staatsweingut Freiburg einem Wachstumszwang, um weiterhin wirtschaftlich relevanten Weinbau zu repräsentieren. Eine vorsichtige Schätzung führt zur Verdopplung der Betriebsgröße bis zum Jahr 2050. Das Weiteren wird in naher Zukunft der Kellereibetrieb vom Standort WBI in Freiburg zum Staatsweingut Freiburg am Blankenhornsberg verlegt. Die Verlegung vergrößert die Kapazität des Kellereibetriebs um 50 Prozent. Die bei einem gemischten und konservativ geschätzten Wachstumsfaktor von 1,5 (Szenario 2035) sind nach Berechnungen des Fraunhofer ISE bereits absolut elf Prozent Eigenverbrauchserhöhung im Vergleich zum Status Quo zu erwarten. Weiter Potenziale, welche bisher nicht in der Analyse berücksichtigt wurden sind der PV-Betrieb der Bewässerungsanlage für 14 Hektar Weinreben (20 m³/h, 22.000m³/Jahr) und der eigenen Hauswasserversorgung mit Hochbehälter. Es gibt außerdem Versuche die Reben mit Heizdrähten (~20 W/m) gegen Frost zu schützen – auch hier könnte PV-Energie zum Einsatz kommen. Zu guter Letzt kann die Elektrifizierung im Weinbau durch Elektrofahrzeuge, Roboter oder Drohnen (z. B. Ausbringung von Pflanzenschutzmittel) als Potenzial zur Eigenverbrauchserhöhung angeführt werden.

7.4.2 Machbarkeit

7.4.2.1 Umsetzungsvorschlag

Ein Vorschlag bezüglich der Koordination der Projekte wurde in Kapitel 7.1.3 beschrieben.

Zu AP 2.1: Das Fraunhofer ISE erstellt Strahlungssimulation für die Agri-PV-Anlagen und arbeitet damit der den PV-Technikpartnern zu. Auf Basis der Strahlungssimulationen werden die initial geschätzten Lichtverfügbarkeiten für die pflanzenbaulichen Kulturen und die prognostizierten Erträge bestätigt oder korrigiert. Diese Daten werden

anschließend zur Optimierung der Ausrichtung und des Designs der Agri-PV-Anlagen genutzt. Das Arbeitspaket enthält Inputs für AP 2.2, kann aber wahrscheinlich erst im Oktober starten. Es werden zwei Monate Puffer zum Ende der Umsetzung von AP 2.2 angedacht, damit Inputs verarbeitet werden können.

Zu AP 2.2: Da die Unterkonstruktionen der Technikpartner schon einen gewissen Entwicklungsstand haben, müssen wahrscheinlich nur geringfügige Änderungen am Design vorgenommen werden. Allerdings kann es sein, dass nach Inputs aus der Statik-Planung die Rammtiefe etc. angepasst werden muss. Die Unterkonstruktionsentwicklung bildet die Basis für die Installation der Anlage (AP 2.5).

Zu AP 2.3: Es gibt keine raumplanerischen Bedenken außer im Punkt Vogelschutzgebiet »Natura2000« und umliegende Brutplätze des Wiedehopfs. Nach Rücksprache mit der Umwelt- und Naturschutzbehörde sind weitere Untersuchungen notwendig. Hierbei muss auch auf den Artenschutz weiterer im Ökosystem lebenden Tiere geachtet werden. Grundsätzlich ist die offene Bauweise des angedachten Agri-PV-Systems und die generelle lichtdurchlässige Ausführung von Agri-PV-Systemen dem Fortbestand des Ökosystems dienlich. Die zusätzliche Hürde stellen nach behördlicher Aussage kein Ausschlusskriterium für die Projektumsetzung dar. Im Rahmen des Projekts wird versucht die entsprechenden Untersuchungen in die Forschungsfragen zu integrieren. Eine generelle Klärung des Einflusses auf die Ökologie ist aus Forschungssicht von Interesse. Erforderlich werden ein Umwelt-, Naturschutz-, Artenschutz-, Boden und Wassergutachten sowie Windlastenprüfung sein. Die Notwendigkeit eines Blendschutzgutachtens ist unwahrscheinlich. Für die Umsetzung des gesamten Genehmigungsverfahrens soll eine Architektenleistung in Auftrag gegeben werden. Im groben Zeitplan wäre zunächst ein Bodengutachten und parallel die Höhenvermessung anzutriggern. Zeitgleich kann die Statik-Planung mit ersten Inputs aus der Unterkonstruktionsentwicklung (AP 2.2) anlaufen, damit weitere Anforderungen schnell zurückkommuniziert werden können. Hier sind bereits Inputs des Bodengutachtens notwendig (z. B. Rammtiefe). Im direkten Anschluss werden Fachbeiträge von Naturschutz, Umweltschutz, Wasserwirtschaft etc. angefordert.

Neben den baurechtlichen Verfahren muss bei der Planung und beim Bau der Anlagen auf den Flächen des Staatsweingut Freiburg berücksichtigt werden, dass alle Bautätigkeiten, über die dem Finanzministerium unterstellte, Abteilung Vermögen und Bau Baden-Württemberg (VB-BW) abzuwickeln sind. Hier ist mit Verzögerungen in der Umsetzung zu rechnen. Auch der Anlagenbetrieb muss zwischen Fraunhofer ISE, ggfs. externen Investoren, WBI und VB-BW geregelt werden, was zu Verzögerungen führen kann.

Erst nach erfolgreich beendetem Genehmigungsverfahren, welches mit der Dauer von einem Jahr konservativ abgeschätzt ist, kann mit der Installation (AP 2.5) begonnen werden.

Zu AP 2.4: Nachdem Netzverträglichkeitsprüfungen durch den verantwortlichen Netzbetreiber durchgeführt wurden (acht Wochen Laufzeit) muss eine Anfrage zur Inbetriebsetzung der Anlage beim Netzbetreiber eingereicht werden. Danach ist mit mindestens drei Monaten Wartezeit zu rechnen. Bei der Stromabnahme müssen Lösungen für den Eigenverbrauchsanteil und die Residualmenge gefunden werden. Am Standort Staatsweingut Freiburg ist die Mitwirkung von VB-BW für die Findung eines Geschäftsmodells notwendig.

Zu AP 2.5: Die Installation der Agri-PV-Systeme wird ungefähr sechs Monate dauern. Nach der Entwicklung der Unterkonstruktion werden ein Monat Puffer für die Planungen zugerechnet.

Zu AP 2.6: Aufgrund der örtlichen Nähe zwischen Intech/Kehl und dem WBI in Freiburg ist eine ständige Optimierung inklusive eines persönlichen Erfahrungsaustausches

gegeben. Die Anlage ist über ein Monitoringsystem fernüberwacht. Die technischen Parameter der Solaranlage werden dem Nutzer auf dessen Rechner zur Verfügung gestellt.

Zu AP 2.7: Auf Basis der bestehenden Energiekonzepte werden technoökonomische Möglichkeiten für förderliche Energiemanagement- und Speichermaßnahmen ausgelotet und versucht im Rahmen der Umsetzungen zu integrieren. Ggf. werden hierzu separate Projekte umgesetzt.

Für die **Arbeitspakete 3** zur Begleitforschung ist ein wissenschaftlicher Mitarbeiter oder eine wissenschaftliche Mitarbeiterin, ggf. eine Promotionsstelle nötig. Das Projekt muss sowohl aus pflanzenwissenschaftlicher/weinbaulicher Sicht, als auch PV-technischer Sicht betreut werden.

Zu AP 3.1: Das AP könnte folgende Aspekte beinhalten:

- BBCH Analyse → Monitoring der Rebenentwicklung insbesondere Austriebzeitpunkt, Blüte mit Augenmerk auf Verrieselung beeinflussende Faktoren, Traubenschluss (Botrytis), Beerenreife, Holzreife
- Beerenproben → Reifeuntersuchung insbesondere physiologische-/Zuckerreife und Säure/Oechsle Verhältnis, Konzentration an hefeverfügbarem Stickstoff.
- Wasserversorgung der Rebe und/oder Verfügbarkeit im Boden
- Bonitur von Umweltschäden wie Frost, Hagel, Sonnenbrand, etc.
- (Optional) Kamera → kontinuierliche Dokumentation der Entwicklung. Datenübertragung mit System von GEOsens absprechen.
- Messung der Umweltfaktoren – Geoinformationssystem mit GEOsens (Wetterstationen)
- PAR, Luft- und Bodenfeuchte, Blattnässe, Luft- und Bodentemperatur, Windgeschwindigkeit Messung nach Austausch der Möglichkeiten mit GEOsens.

Zu AP 3.2: Das AP könnte folgende Aspekte beinhalten:

- Beschreibung/Modellierung von Pflanzenentwicklung und Ertrag unter APV/REF
- Erläuterung und Deutung der Ursachen, Veröffentlichung in Fachzeitschriften, wissenschaftlicher Diskurs
- Traubenlese getrennt nach Parzellen, evtl. mehrere Erntezeitpunkte
- Weinausbau im Versuchskeller des WBI
- Vereinbarungen mit Praxisstandorten und WBI zur Traubenabgabe notwendig

Zu AP 3.3: Das AP könnte folgende Aspekte beinhalten:

- Chemische Analyse auf Inhaltsstoffe
- Sensorische Analyse auf Qualität und Besonderheiten

Zu AP 3.4 und AP 3.5: optional

- Monitoring und Vergleich von Krankheiten und Schädlingen
- Arbeitspaket wird im Rahmen der verfügbaren Ressourcen geleistet
- Einfluss der Anlage auf die Biodiversität des Standortes
- Arbeitspaket wird im Rahmen der verfügbaren Ressourcen WBI-seitig geleistet

- Begleitung des Forschungsprojekts durch Umwelt-, Naturschutz- und andere Behörden im Rahmen des notwendigen rechtlichen Kontexts (Eigenleistung der Behörden)

Das **Arbeitspaket 4** enthält Aufgaben im Rahmen der Berichterstattung für das Projekt und betrifft thematisch alle bisher beschriebenen Arbeitspakete. Es soll über die Projektlaufzeit ein Zwischenbericht und ein Abschlussbericht erstellt werden. Folgende Arbeitspakete werden im Rahmen der Aufwandsberechnung nicht berücksichtigt, und gelten als Empfehlung für ein weiteres intensives Forschungsprojekt am WBI, was beispielsweise durch eine Promotionsstelle abgedeckt sein könnte.

- Untersuchungen zum Lichtbedarf der Rebe und ihres Verhaltens unter verringerten Beleuchtungsintensitäten
- Versuche mit unterschiedlichen Tracker-Einstellungen und entsprechend gesteuerter Beleuchtung hinsichtlich Lichtsättigungspunkt, Schattenanpassung, spezielle kompensierende Rebenerziehung etc.
- Ideale Tracker-Profile zur Stromerzeugung und Pflanzenwachstums
- Potenzial zur Pflanzenschutz einsparung durch spezielle Tracker-Profile, z. B. Wetter gesteuert - waagrecht als Regenschutz, maximale Belichtung bei Blattnäse, stärkere Beschattung bei mehr Sonne etc.
- Anhand der Entwicklung und der Lichtbedürfnisse das Modell von Vitimeteo (Staatliches Weinbauinstitut Freiburg, 2021) zur Rebenentwicklung um Belichtung ergänzen, um Steuerungsempfehlungen für Praxisanlagen anzubieten.

7.4.2.2

Technische Machbarkeit

Technischen Rahmenbedingungen

Für das Anforderungsmanagement wurde im Rahmen der Durchführbarkeitsstudie eine Anforderungsliste mit den wichtigsten Rahmendbedingungen erstellt. Der Katalog befindet sich im Anhang A

Anhang A (Tabelle A 2). Neben den Anbausystem- und Bearbeitungsmethodenbedingten Anlagendimensionen wurde die Konstruktion insbesondere auf die Hauptfunktionen *Reifeverzögerung* und *Verdunstungsminderung* ausgelegt. Nebeneffekte der PV-Überdachung, wie Hitze-, Sonnen-, Hagel-, Regen-, und Frostschutz, wurden mit geringerer Priorität bewertet. Bei der Installation von Agri-PV-Anlagen sind Auswirkungen auf die Bodenbeschaffenheit zu berücksichtigen. So verursachen die Baumaßnahmen vermutlich eine Bodenverdichtung. Lockernde Maßnahmen wie z. B. tiefwurzelnde Pfahlwurzelbegrünung sind als Kompensation durchzuführen. Ansonsten sind eine schlechte Belüftung und Wasseraufnahme sowie Staunässe und ein verändertes Bodenökosystem mit mehr Anaerobier, einschließlich stickstoffveratmenden Bakterien (N-Verlust), zu erwarten. Erfahrungen mit Bodenlockerung im Weinbau sind aber zu Genüge vorhanden und stellen daher kein Problem dar.

Bei Agri-PV-Anlagen ist die Verschmutzungsneigung höher als bei FFA (Besson et al., 2017). Obwohl im Weinbau oft sogenannte Recycling-Spritzen Anwendung finden, welche die Pflanzenschutzmittel horizontal applizieren und Restmengen wieder auffangen, sollte mit haftendem und intransparentem Pflanzenschutzmittelbelag auf den Modulen gerechnet werden. Da spezielle Reinigungseinheiten in der derzeitigen Projektentwicklung nicht enthalten sind, werden erhöhte Reinigungskosten geschätzt und in die Betriebskosten integriert.

Die in 7.4.1 beschriebene Verschattung soll nach der European Commission (2021) (vgl. Fig. 34) berücksichtigt werden. Außerdem sollen Windgeschwindigkeiten von 35 m/s als Bemessungswert herangezogen werden, da sich die Agri-PV-Anlage in einer Kessellage mit erhöhten Windgeschwindigkeiten befindet. Die 3-Jahres-Höchstwerte (höchste Windgeschwindigkeit, die in den letzten 3 Jahren häufig gemessen wurde) betragen: 17 m/s Tal: Niederrotweil; 21 m/s Blankenhornsberg geschützt, bodennah. Das Lichtmanagement in der im Projekt berücksichtigten Wachstumsphase von April bis Oktober ist bei Weinreben besonders bedeutend, um der Hauptfunktion des Agri-PV-Systems zur gezielten Reifeverzögerung gerecht zu werden. Folgende Tabelle 25 stellt die Lichtenforderungen dar, welche in initialer Schätzung durch Expertinnen und Experten am Weinbauinstitut Freiburg definiert wurde.

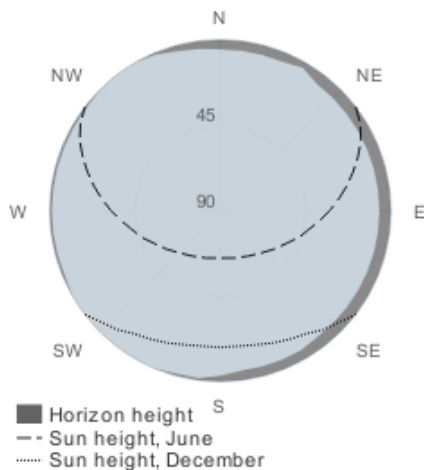


Fig. 34 Horizontlieniendiagramm für die Flächenoption 2 am Standort Staatsweingut Freiburg.

Tabelle 25 Lichtmanagement-Anforderungen für Weinreben anhand BBCH Codes.

Entwicklungsstadien	Anforderung PAR
BBCH < 53: Vor der Blüte	Bis zu > 60 Prozent PAR möglich
BBCH 53 - 69: Geschein / Blüten	Mindestens 80 Prozent PAR (ertragsbestimmende Knospenbildung priorisieren)
BBCH 71 - 89: Fruchtreife (Säureabbau, Aromabildung)	70 – 80 Prozent PAR (gezielte Reifeverzögerung)
Nach Ernte	> 50 Prozent PAR; minimal PAR (Stromertrag priorisieren)

Die relative verfügbare PAR wird hier von Wachstumsstadien anhand des BBCH-Codes festgemacht (Staatliches Weinbauinstitut Freiburg, 2021). Wie zu erkennen wären 70 Prozent PAR bzw. 30 Prozent Verschattung hinnehmbar – bis auf die kritische Phase, in der Geschein und Blüten entstehen. Hier sollten 20 Prozent Verschattung nicht überschritten werden. In nachfolgender Graphik (Fig. 35) können die BBCH-Codes Zeitpunkten zugeordnet werden.

Die Dachflächen am Standort Staatsweingut Freiburg – Blankenhornsberg wurden seitens Vermögen und Bau mit einem Dachflächen-PV-Potenzial von 100 Prozent bewertet. Da Dachflächen durch Vermögen und Bau vorrangig mit PV-Anlagen ausgestattet

werden sollen und die Dachflächen in absehbarer Zeit belegt werden sollen, muss eine entsprechende PV-Anlage mit einer Leistung von 180 kWp vorrangig hinsichtlich Eigenverbrauchs-Szenarien berücksichtigt werden.



Fig. 35 Historischer Wachstumsverlauf der Weinreben anhand BBCH-Codes (Staatliches Weinbauinstitut Freiburg, 2021).

Agri-PV-System-Konzept

Die Trackingsysteme der Fa. Intech stehen auf eingerammtten Pfählen. Hierzu wird vorab ein Rammversuch mit Auswertung des Untergrundes durchgeführt. Durch die Vermeidung von Fundamentierungen wird der Nachhaltigkeit der Gesamtanlage Rechnung getragen. Sollten die für die Standsicherheit notwendigen Einrammtiefen nicht erreicht werden, so würden zusätzliche Bohranker eingesetzt. Aufgrund der Querkräfte auf die Lager, bzw. Lagerböcke kann der Intech Reihentracker nur bis ca. 17° Neigung eingesetzt werden. Bei Steillagen sind nur feststehende Unterkonstruktionen möglich. Bei den bisher verwendeten elektrischen Stellantrieben der Trackingsysteme müssen in einem Turnus von ca. fünf Jahren die Antriebe geöffnet und gereinigt werden (um Totalausfälle zu vermeiden). Um einen 25-Jährigen robusten Betrieb zu gewährleisten, bietet die Fa. Intech das Trackingsystem daher mit Hydraulikantrieb an.

Erkennbar an der PV-Tischbreite von 2.000 mm im Vergleich zur Modulreihenabstand von 6.000 mm wird bei Standardmodulen eine Flächenbelegungsrate (GCR) von 33,3 Prozent erreicht. Die Tischbreite kann optional auf 1.700 mm oder 1.000 mm reduziert werden, um mehr Lichtverfügbarkeit für die Weinreben, unabhängig vom Trackingalgorithmus, zu erreichen. Obwohl Raytracing-Simulationen zur Anlagenauslegung auf bestimmte Werte der pflanzenverfügbaren Strahlung durch das Fraunhofer ISE im Projektverlauf noch ausstehen, kann anhand von Literaturwerten davon ausgegangen werden, dass sich in der abgebildeten Konstellation bei einer GCR von ~35 Prozent etwa 65 Prozent der durchschnittlichen PAR im Sommer erreicht werden (Trommsdorff et al., 2021; Valle et al., 2017; Willockx et al. 2020). Da der lichtstarke Mai als kritische Phase gilt und wie beschrieben 80 Prozent PAR für die Weinreben verfügbar sein sollte, können Lichtsimulationswerte aus der Vorstudie vom Standort LTZ-Augustenberg herangezogen werden. Hier wurde mit einer GCR von ~47 Prozent bereits 75 Prozent PAR erreicht. Entsprechend skaliert würde mit einer GCR von 33,3 Prozent etwa 85 Prozent der PAR im Mai erreicht werden. Da die Vergleichbarkeit der Systeme ohne Lichtsimula-

tion unklar ist, wird weiterhin von 65 Prozent PAR ohne Antitracking ausgegangen. Für eine PV-Reihenbepflanzung wären semitransparente Module vorteilhaft. Allerdings müssten bei gleicher GCR und folglich PAR-Auslegungspunkt breitere Modultische verwendet werden. Die maximale Modultischbreite liegt in theoretischer Betrachtung mit einem Reihenabstand von zwei Metern, einer Laubwandhöhe von 2,3 Metern und einer Laubwandbreite von ~300 mm bei 3.920 mm. Bei vollen Modulen ergäbe sich eine GCR von 60 Prozent und eine entsprechend geschätzte relative PAR von ~50 Prozent. Werden beispielsweise zusätzlich Module des Typs BISOL Lumina mit 41,5 Prozent transparenter Modulfläche verwendet, ergäbe sich wiederum eine GCR von ~35 Prozent und entsprechend höhere PAR Werte von durchschnittlich 65 Prozent. Das Szenario ist durch »WBI-S-Track-At-semi« dargestellt. Nach den Aussagen von Currie (1983) und Cho et al. (2020) lässt sich eine PAR von 160 W/m² als ausreichend für das Weinrebenwachstum ableiten. Das entspricht etwa ~83 Prozent der PAR im durchschnittlichen Mai von 193 W/m² PAR (European Commission, 2021). Entsprechend hat eine Verschattung von 20 Prozent (80 Prozent PAR) bereits die Wirkung die Photosyntheseleistung geringfügig zu minimieren. Um verschiedenen Systemvarianten zu vergleichen sind in Tabelle 26 die wichtigsten Auslegungsparameter von verschiedenen Szenarien zusammengefasst dargestellt.

Das Szenario »WBI-S-Track« stellt das beschriebene Agri-PV-System ohne Antitrackingalgorithmus dar, während »WBI-S-Track-AT« zusätzlich den Antitrackingalgorithmus verwendet, um die Verschattung entsprechend den Wachstumsperioden-spezifischen Anforderungen zu verringern. Eine PAR von ~154.4 W/m² (80 Prozent des Maidurchschnitts) kann eingehalten werden, indem morgens und abends Licht dem PV-System entzogen und den Pflanzen bereitgestellt wird. Da 70 Prozent PAR für den Großteil der Wachstumsperiode ausreichend erscheint, ist der zeitliche Anteil an nicht genutzter PV-Systemleistungspotenzial gering, sodass sich wirtschaftliche Szenarien ergeben können. Wie initiale Simulationen gezeigt haben, sind die Systemkosten per kWp zu hoch, dass sich eine starke Überdimensionierung der Agri-PV-Anlage und PAR-Steigerung durch starke Antitracking-Gegenmaßnahme wirtschaftlich nicht lohnt.

Die Systemvariante »WBI-S-Track-AT-full« stellt den Vergleich zu Querüberspannten System her, welche eine PV-Überdachung von jeder Rebzeile ermöglicht. Damit dennoch eine PAR von 65 Prozent erreicht wird müssen semitransparente Module verwendet werden. Dies ermöglicht auch die Bepflanzung der Weinrebenreihen, in welcher die überspannende Agri-PV-Unterkonstruktion auf Säulen aufgeständert ist. Module des Typs BISOL Lumina mit 41,5 Prozent Transparenz, ergäben bei einem Meter Modultischbreite eine GCR von ~35 Prozent. »Süd-REF« ist eine Süd-ausgerichtete Vergleichs-PV-FFA mit Standardparametern aus Schindele et al. (2020), welche auf der gleichen Fläche Platz finden kann.

Tabelle 26 Designparameter verschiedener Agri-PV-Anlantentypen.

	WBI-S-Track	WBI-S-Track-AT-semi	WBI-S-Track-AT	WBI-S-Track-AT-full	Süd-REF
Modultischbreite [m]	2	3,92	2	1	3,33
GCR* [%]	33,33	35	33,33	35	47
Modultransparenz [%]	0	41,5	0	41,5	0
Reihenabstand [m]	6	6	6	1,5	7
Bifazial	Nein	Nein	Nein	Nein	Nein
PAR-Ziel [%]	65	65	80	80	-
Ausrichtung [°] (N=0, E=90, S=180, W=270)	162	162	162	162	180
Neigungswinkel [°]	+/- 60	+/- 60	+/- 60	+/- 60	20
DC Leistung [kWp]	171,3	171,3	171,3	184,5	243,8

Netzanschluss

Bei den Intech Agri-PV Anlagen kommen String-Wechselrichter zum Einsatz. Diese können im Feld verteilt, bedarfsgerecht montiert werden. Im Rahmen der Erstellung des Unterkonstruktion werden die AC-Kabel im Boden mitverlegt. Wie in Fig. 36 dargestellt können Kabel nach derzeitigem Stand in bestehende Leerrohre einer betriebseigenen Kläranlage am westlichen Agri-PV-Flächenrand verlegt werden und an der bestehenden Transformatorstation an das Mittelspannungsnetz angeschlossen werden. Die Leitungslänge zum Netzanschlusspunkt liegt bei etwa 320 Metern. Beim Netzbetreiber bnNETZE wurde frühzeitig eine Netzverträglichkeitsprüfung für eine 150 kWp Anlage in Auftrag gegeben, welche ergeben hat, dass die Erzeugungsanlage problemlos angeschlossen werden kann. Die Zusage ist bis 07.11.2021 gültig, dann wird eine neue Anfrage notwendig.

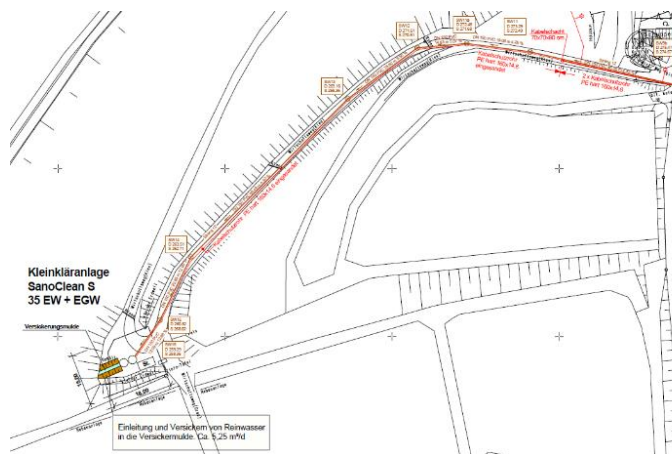


Fig. 36 Kabelführung zur Kläranlage am Standort Staatsweingut Freiburg.

Um die Effekte der Agri-PV-Anlage auf Mikroklima und Pflanzenwachstum unter den verschiedensten Rahmenbedingungen abschätzen und vorhersagen zu können, wird die Antitrackingfunktionalität ausgenutzt, um verschiedene Mikroklima- und Lichtsituationen zu erzeugen. Die gewonnenen Ergebnisse können im weiteren Verlauf zur Kalibrierung und Weiterentwicklung von Pflanzenwachstums (Ertrags)- und Landnutzungsmodellen genutzt werden. Im Zusammenschluss mit anderen Forschungsstandorten können die Erkenntnisse zu den biotischen und abiotischen Faktoren und deren Auswirkungen Kultur- und Anlagen-übergreifend zur Einschätzung der Auswirkung von Agri-PV-Anlagen auf die Ertragsquantität und -qualität der Weinreben genutzt werden. Zur Messung der Umweltfaktoren sollen Geoinformationssysteme (Wetterstationen) von GEOsens GmbH genutzt werden. Messstationen bzw. Messfühler mit Verbindung zu zentraler Station im Feld werden über die REF und APV Flächen verteilt (vgl. Fig. 30). Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Windgeschwindigkeit, Blattnässe und Luftfeuchte werden je ein Mal pro REF und APV Fläche gemessen. PAR und Lufttemperatur sollen nach Möglichkeit in jeder Parzelle kontinuierlich gemessen werden. Optional ist eine Kamera für die kontinuierliche Übertragung der Entwicklung angedacht. Diese kann am Parzellenrand mit einem Breitwinkelobjektiv aufgestellt sein, damit REF und APV Flächen aufgenommen werden.

7.4.2.3

Wirtschaftliche Machbarkeit

Um die technoökonomische Sinnhaftigkeit der Agri-PV-Systeminstallation im Rahmen des Projekts in den verschiedenen Varianten zu vergleichen, wurde zunächst die rein photovoltaische Seite hinsichtlich Ertrags und Wirtschaftlichkeit simuliert und anschließend der Einfluss der landwirtschaftlichen Wertschöpfung und die Landnutzung entlang der DIN SPEC in die Betrachtung der Wirtschaftlichkeit mitaufgenommen.

PV-Ertragssimulation

Die verschiedenen Anlagendesigns wurden bis auf die Varianten «...Track-AT» mit der Software System Advisory Model (SAM) von NREL¹ simuliert. Alle Ergebnisse sind Durchschnittswerte der Simulationsdauer über 25 Jahre, wobei eine jährliche Leistungsminderung von 0,25 Prozent angenommen wird. Die Erträge der Varianten «EW-Track-AT -...» wurden nach der SAM-Simulation in einem selbstentwickelten Python-Skript manipuliert und zur Kostenrechnung wieder in SAM-Formeltabellen zurückgespielt. Leistungseinbußen auf der PV-Seite durch Antitracking, wie in Fig. 33 dargestellt, werden berücksichtigt.

Zur Simulation des PV-Eigenverbrauchs steht ein Lastgang von 2019 in 15-Minuten Auflösung zur Verfügung. Trotz hoher Wahrscheinlichkeit eines zukünftig steigenden Strombedarfs und Betriebsintegration von Energiespeicherlösungen im Rahmen eines erneuerten Energiekonzepts, ist die technische Machbarkeit und die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung auf den Status Quo bezogen. Bestandsanlagen und geplante Anlagen werden mit Standardwerten aus Quatschning und Hanitsch (1998) (30° Anstellwinkel, Süd-Ausrichtung, GCR von 0,333) berücksichtigt. Wetterdaten werden Standortgenau

¹ National Renewable Energy Laboratory, U.S. Department of Energy

genutzt (European Commission, 2021). Für den Aufbau der PV-Modelle ist folgendes anzumerken:

- Modulparameter entsprechen in Abhängigkeit des Transparenzgrades der Modulreihe BISOL Lumina
- Als Wechselrichter wurden SUNNY TRIPOWER CORE1 STP50 vorgesehen
- DC/AC Verhältnis von ~1,21 wurde gewählt

Die Systemkosten sind in Tabelle 27 abgebildet. Reinigungskosten von neun Euro pro Jahr und kWp wurden abgeschätzt und in OPEX der Agri-PV Anlagen berücksichtigt. Das entspricht einer Reinigung aller Module alle zwei Jahre. Die Systemkosten für die Varianten »WBI-S-Track-AT-full« wurden aus Kostenaufstellungen für Agri-PV-Trackingsysteme im Obstbau (vier Meter Höhe, ~300 kWp), welche eine ähnliche Komplexität besitzen, abgeleitet und entsprechend der Leistung skaliert. Sonstige wichtige Punkte:

- Mehrwertsteuer wurde nicht hinzugerechnet und wird als durchlaufender Posten betrachtet.
- Es gibt keinen Unterschied in den Genehmigungskosten.
- Genehmigungskosten und Netzanschlusskosten wurden anhand interner Informationen aus vergleichbaren Projekten geschätzt.
- Für Standardmodule für »Süd-REF« wurden mit 250 €/kWp veranschlagt (Schindele et al. 2020).

Tabelle 27 Systemkostenvergleich der Agri-PV-Optionen am Standort Blankenhornsberg.

	WBI-S-Track	WBI-S-Track-AT-semi	WBI-S-Track-AT	WBI-S-Track-AT-full	Süd-REF
Module [€]	56.525,04	150.707,09	56.525,04	150.707,09	60.890,00
Inverter [€]	20.554,56	20.554,56	20.554,56	175.794,19	16.793,00
Restliche Systemkosten [€]	116.989,70	116.989,70	116.989,70	207.337,54	61.427,00
Installation [€]	21.924,86	21.924,86	21.924,86	44.640,29	36.563,00
Genehmigung [€]	58.538,00	58.538,00	58.538,00	58.538,00	58.538,00
Netzanschluss [€]	82.132,60	82.132,60	82.132,60	88.450,49	88.450,49
CAPEX gesamt [€]	356.664,76	469.431,56	356.664,76	571.809,08	322.661,24
OPEX gesamt [€/Jahr]	5.086,00	5.477,00	5.086,00	5.477,00	4.388,00

Nachfolgend (Tabelle 28) sind die finanziellen Parameter der Ertragssimulation abgebildet. Die Stromkosten für das Szenario A) « VB-BW als Betreiber » (VB-BW als selbsterzeugender Letztverbraucher) wurden abgeschätzt und als Einsparpotenzial bei Eigenverbrauch, abzüglich der 40 Prozent der EEG-Umlagen, zugrunde gelegt. Alle weiteren Parameter lehnen sich an Werte aus Schindele et al. (2020) an. Die Stromkosten für das

Ersparnis am Eigenverbrauch eskaliert in der Simulation jährlich um ein Prozent. Beim Steuersatz wurden 30 Prozent angenommen. Für Szenario B) wird angenommen, dass der Eigenverbrauchsanteil des PV-Strom durch VB-BW zu den üblichen Konditionen abgenommen wird. Der externe Investor spart sich allerdings aufgrund der Abnehmer-nähe Stromsteuer und Netzentgelte, was in der Berechnung wie eine Einsparung am Eigenverbrauch behandelt werden kann.

Tabelle 28 Finanzielle Parameter.

	Strompreis [ct/kWh]	Ersparnis – EV [ct/kWh]	Verschuldung [%]	WACC [%]	Inflation [%]
A) VB-BW als Betreiber	5	16,55	100	3,1	2
B) VB-BW als Stromabnehmer	5	8,94	100	3,1	2

Zur Berechnung der Gestehungskosten in Tabelle 29 und für die Wirtschaftlichkeitsbe-trachtung wurde nur Szenario B) »VB-BW als Stromabnehmer« berücksichtigt, da der Eigenverbrauchsanteil zu gering ist für einen Anlagenbetrieb durch den Flächenverwal-ter Vermögen und Bau Baden-Württemberg.

Tabelle 29 Ergebnisse der Ertragssimulation - VB-BW als Stromabnehmer.

	WBI-S- Track	WBI-S- Track-AT- semi	WBI-S- Track-AT	WBI-S- Track-AT- full	Süd- Referenz
kWh/Jahr	199.045	138.317	129.839	138.317	276.013
kWh/Wachstumsperiode	156.077	93.376	86.870	93.376	216.980
kWh/WachstumsperiodeMai	25.652	9.287	8.640	9.287	36.110
kWh/WachstumsperiodeReife	113.614	66.033	61.419	66.033	156.710
kWh/Wachstumsperiode m2	59,4	35,5	33,1	35,5	85,8
Spez. Ertrag [kWh/kWp]	1.162	750	758	750	1.132
EV [%]	4,84	2,22	2,23	2,22	4,36
LCOE [ct/kWh]	11,33	20,92	17,53	24,77	7,33

Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Simulationen zeigen, dass im Szenario »WBI-S-Track-AT« mit einem maximalen Nei-gungswinkel der Module von 60° mittels Antitracking die Ziel PAR im Maidurchschnitt erreicht werden kann, wenn für Kompensation der geringeren Wirkzeit des Antitra-ckings (AT) morgens und abends ein PAR-Level von 270 W/m2 der AT-Steuerung als Schwellenwert übergeben wird. Das Ergebnis ist eine durchschnittliche Verschattung von 80 Prozent. Die Leistungseinbußen in dieser Zeit (kWh/WachstumsperiodeMai, siehe Tabelle 29) sind allerdings erheblich. Ebenso konnte in der restlichen Wachstums-phase 75 Prozent PAR des Maidurchschnitts mit einem PAR-Level von ~205 W/m2 auf-rechterhalten werden (kWh/WachstumsperiodeReife, siehe (Tabelle 29). Die Ergebnisse der Simulationen und Berechnungen sind in Tabelle 30 dargestellt. PAR_effektiv ohne

Indizierung ist entsprechend die relative PAR über die ganze Wachstumsphase von April bis Oktober.

Tabelle 30 Ergebnisse der Wirtschaftlichkeitsanalyse.

	WBI-S-Track	WBI-S-Track-AT-semi	WBI-S-Track-AT	WBI-S-Track-AT-full
PAR_effektiv [%]	65	74,6	74,6	74,6
PAR_effektiv _{Mai} [%]	65	80	80	80
PAR_effektiv _{Reife} [%]	65	75	75	75
LER [%]	138,6	133	106,7	141,3
PPR	0,132	0,0036	0,144	0,534

Bei der Berechnung von Landnutzungseffizienz (LER, vgl. Kapitel 6.2) und der Price-Performance-Ratio (PPR) (Stephan Schindele et al., 2020) werden keine Ertragseinbußen durch Verschattung berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass die qualitätsbegründeten Mengenbegrenzungen auf den Rebflächen (je nach Sorte 80 bis 100 kg/ar), nicht unterschritten wird. Die Ausdünnung der Weinreben zur gezielten Ertragsreduzierung für höchste Weinqualität kann entsprechend geringer ausfallen. Allerdings muss bei den Systemen bis auf »WBI-S-Track-AT-full« der Ertrag aufgrund der unbepflanzten PV-Reihen um ein Drittel reduziert werden. Analog dazu wird die Flächennutzung reduziert. Des Weiteren werden PPR und LER nur über die Wachstumsphase evaluiert. Das bedeutet, wenn das ganze Jahr mit entsprechender PV-Energieerzeugung mitberücksichtigt würde, würden die Ergebnisse optimistischer ausfallen. Beispielsweise läge die Landnutzungseffizienz von »WBI-S-Track-AT« über das ganze Jahr betrachtet bei 113,7, d. h. es wäre 13,7 Prozent mehr Fläche notwendig, wenn dieselbe Menge an Wein und PV-Energie auf separaten Flächen produziert würde.

Die angedachte Agri-PV-Fläche auf den Weinflächen »Doktorgarten« ist nach den Standards zur Qualitätssicherung des VDP als Grosse Lage® klassifiziert (VDP, 2020). Bei einer Ausbeute von 0,5 l/m² und einem angenommenen Verkaufspreis von 20 €/l ergibt dies eine weinbauliche Agri-PV-Flächenleistung von ~26.270 € ohne Agri-PV-System. Der jährliche PV-Energieertrag aus »WBI-S-Track« liegt bei durchschnittlich 10.331 €. Hier wird bereits die Sinnhaftigkeit des Aufwands zum Erhalt des Weinbaus unter Agri-PV-Systemen deutlich, welche im Parameter PPR (je kleiner desto besser) definiert wird.

Würden bei »WBI-S-Track« und »WBI-S-Track-AT« semitransparente Module verwendet und die PV-Reihen bepflanzt werden, ergäbe sich ohne Ertragsreduktion durch unbepflanzte PV-Reihen eine höhere LER von 165 bzw. 133 Prozent, wenn der Ertrag unter den transparenten Modulen mit 80 Prozent berücksichtigt wird – hierbei wird die Annahme getroffen, dass Weinreben direkt unter den semitransparenten Modulen in der angedachten Konstellation eine zu geringe Solarstrahlung erfahren.

Finale Systemdefinition für den Standort Staatsweingut Freiburg

Aufgrund der notwendigen Forschungstauglichkeit des Agri-PV-Systems und der weinbauseitigen hohen Wertschöpfung, sollte in einer finalen Systementscheidung eine Variante mit Antitrackingfunktionalität ausgewählt werden. Anhand der Parameter PPR und LER wird deutlich, dass die Variante »WBI-S-Track-AT-semi« installiert werden sollte. Diese Version deckt den WBI-seitigen Wunsch ab, die PV-Reihen zu bepflanzen. Die technische Umsetzbarkeit von breiteren Modultischen mit semitransparenten Modulen kann erst im Verlauf des Projekts geklärt werden, weshalb diese Systementscheidung ein Kalkulationsrisiko mit sich bringt. Alternativ kann die Version »WBI-S-Track-AT« gewählt werden – hierbei ist zu beachten, dass Weinreben unter nahezu intransparenten Modulen wahrscheinlich keinen hinreichenden Qualitätsertrag liefern. Wie am Parameter PPR zu erkennen ist die Wirtschaftlichkeit der Flächendoppelnutzung durch querüberspannte Systeme, wie im Szenario »WBI-S-Track-AT-full« abgebildet, geringer.

Förderbedarf

Die in 7.4.2.4 genannten technischen und ökonomischen Risiken stehen wertvollen gesellschaftlichen Potenzialen gegenüber. Der so begründete den Forschungsbedarf ist nur durch eine Projektförderung bedienbar. Ein wirtschaftliches Projekt ergibt sich ohne Skalierungseffekte und ohne EEG-Förderung unter folgenden Förderbedingungen:

Tabelle 31 Förderbedarf der ausgewählten Varianten.

	Förderbedarf WBI-S-Track-AT		Förderbedarf WBI-S-Track-semi	
	[%]	[€]	[%]	[€]
Gesamteinnahmen über 5 Jahre		33.042		35.184
Restförderbedarf	76	349.051	80	461.631
Gesamteinnahmen über 10 Jahre		66.084		70.368
Restförderbedarf	74	341.437	78	453.831
Gesamteinnahmen über 15 Jahre		99.126		105.553
Restförderbedarf	73	333.823	77	446.031
Gesamteinnahmen über 20 Jahre		132.168		140.737
Förderbedarf (Standzeit 20 Jahre)	71	326.210	76	438.231
Gesamteinnahmen über 25 Jahre		165.209		175.921
Förderbedarf (Standzeit 25 Jahre)	70	318.596	74	430.431

Nachfolgende Tabelle 32 enthält die Gesamtauflistung der Projektvorkalkulation.

Tabelle 32 Projektkosten-Vorkalkulation für den Standort Staatsweingut Freiburg.

	WBI-S-Track-AT	WBI-S-Track-AT-semi	Fa. Intech
PM	60	60	10
Personalkosten/Monat [€]	6.500	6.500	8.000
Personalkosten gesamt [€]	390.000	390.000	80.000
Materialkosten + Sachleistungen [€]	30.000	30.000	
Reisekosten [€]	7.000	7.000	
Förderquote [%]	100	100	40
Kosten APV-Prototyp [€]	458.377	578.968	
Förderbedarf APV-Prototyp [€]	326.210	438.231	
Förderanteil APV-Prototyp [%]	71	76	
Gesamtkosten [€]	885.377	1.005.968	80.000
Förderquote gesamt [%]	85	86	40
Förderung [€]	753.210	865.231	32.000

7.4.2.4 Risikobewertung

Die Flächen des Staatsweingut Freiburg sind im Besitz des Landes und werden von »Vermögen und Bau Baden-Württemberg« (VB-BW) verwaltet. VB-BW hat sich aufgrund des geringen Eigenbedarfs und des Vorrangs von Dachflächen dagegen ausgesprochen, den Betrieb der Agri-PV-Anlagen zu übernehmen. Mögliche alternative Lösungsansätze wären der Betrieb der Agri-PV-Anlage über einen externen Investor. Z. B. ist der Anlagenbetrieb und Finanzierung über einen Energieversorgers denkbar. Die Wirtschaftlichkeit wurde auf dieser Basis berechnet – das Projekt kann in Abhängigkeit der Förderung ökonomisch interessante Investitionsmöglichkeiten für externe Anlagenbetreiber ergeben. Dennoch ist die Projektabhängigkeit von der Initiative externer Anlagenbetreiber ein hohes Risiko. Die technische Umsetzbarkeit der Intech Reihentracker Agri-PV-Systeme im Gefälle unter Standortspezifischen Randbedingungen, insbesondere die Anforderung der Bepflanzung der PV-Reihen, stellt ein mittleres Risiko dar – weitere Entwicklungsaufwände könnten notwendig werden.

Der Erhalt der Baugenehmigung stellt ein weiteres Risiko dar. Da die Gemeinden Ihringen, Vogtsburg und Breisach dem Projekt positiv gegenüberstehen, wird dieses Risiko aber als gering eingeschätzt. Raumplanerische Bedenken gibt es nur im Punkt Vogelschutzgebiet »Natura2000« und umliegende Brutplätze des Wiedehopfs. Nach Rücksprache mit der Umwelt- und Naturschutzbehörde sind weitere Untersuchungen notwendig. Diese zusätzliche Hürde stellen aber nach behördlicher Aussage kein Ausschlusskriterium für das Projekt dar. Außerdem stellen die erforderlichen Gutachten (Umwelt-, Naturschutz-, Artenschutz-, Boden-, Wasser-, und Blendschutzgutachten, Windlastenprüfung) ein Risiko hinsichtlich Kosten und Zeitplan dar.

7.5

Standort Oberkirch-Bottenau

7.5.1

Forschungskonzept und Innovationsgrad

Bei der angedachten Agri-PV-Fläche am Standort Oberkirch-Bottenau handelt es sich um eine Weinbau-Steillage. Daher ist die Montage eines fixierten Rackingsystemes geplant. Der Bau von Agri-PV-Systemen in Steillagen gilt als besonders herausfordernd und stellt damit an sich einen hohen Innovationsgrad dar. Das angedachte System ist bis auf die Tracking-Funktionalität mit den in Kapitel 7.4.1 beschriebenen Systemen vergleichbar. Dabei wird auf eine Fundamentierung verzichtet.

Die für Agri-PV vorgesehene Fläche wird neu angelegt, die Sortenwahl muss noch mit der Winzergenossenschaft abgestimmt werden – angedacht sind aber *Riesling* oder *Traminer*.

An diesem Standort sollen im Vergleich zum Staatsweingut Freiburg nur jede dritte Pflanzreihe mit Agri-PV-Systemen belegt werden. Damit soll der maschinelle Einsatz von Laubschnittarbeiten ermöglicht werden. Um die Pflanzenschutzmittel (Spritzbrühe) regelmäßig entfernen zu können ist die maschinelle Reinigung über einen Putzroboter (bereits vorhanden) geplant.

Ziel des Projektstandorts ist es zu zeigen, dass auch Steillagen im Weinbau zukünftig erfolgreich betrieben werden können. Dies wird durch eine positive Pflanzenentwicklung, hervorgerufen durch die Teilbeschattung, und ein gewisses Zusatzeinkommen durch die Stromproduktion erreicht. Außerdem kann durch die Ladung von E-Nutzfahrzeugen zukünftig der Energiekreislauf noch besser geschlossen werden. Erste Batterie-Nutzfahrzeuge sind auf dem Markt, weitere in der Entwicklung. Durch die zu erwartende positive Entwicklung der Rebpflanzen unter der Teilbeschattung ist die Produktion von regenerativer Energie ohne Flächenverlust möglich.

7.5.2

Machbarkeit

7.5.2.1

Organisatorische und zeitliche Machbarkeit

Die Arbeitspakete wurden bereits in 7.4.2.1 erläutert.

7.5.2.2

Technische Machbarkeit

Nachfolgende enthält die Gesamtaufstellung der Projektvorkalkulation. Die Begleitforschungsaufwände für das WBI Freiburg sind in Kapitel 7.4.2.3.

Tabelle 33 Projektkosten-Vorkalkulation für den Standort Oberkirch-Bottenau.

	Fa. Intech	C. Vollmer	Gesamt
PM		16	
Personalkosten/Monat [€]		4.200	
Personalkosten gesamt [€]		67.200	67.200
Förderquote [%]		40	40
Kosten APV-Prototyp [€]	686.938		686.938
Förderbedarf APV-Prototyp [€]	436.023		436.023
Förderanteil APV-Prototyp [%]	63		63
Gesamtkosten [€]	686.938	67.200	754.138
Förderquote gesamt [%]	63	40	61
Förderung [€]	436.023	26.880	462.903

7.5.2.3 Risikobewertung

Das Risiko ist, keine Genehmigung für die Agri-PV-Anlage zu erhalten. Frühere Versuche in dieser Richtung wurden von der Baubehörde abgelehnt. Im jetzigen Fall berät sich die Baubehörde, nachdem vor einem Jahr eine Voranfrage gestartet wurde, mit dem Regierungspräsidium Freiburg. Die Vorabstimmung ist abgeschlossen mit der geplanten Änderung des Flächennutzungsplanes für die Anlagenstandorte als »Sondergebiet Freiflächenanlage«. Eine Detailprüfung wird im förmlichen Prozess dennoch erfolgen. Von Seiten des zuständigen Regionalverbandes RVSO gab es auf Anfrage aber keine raumordnerischen Bedenken.

7.6 Standort Vogtsburg

7.6.1 Forschungskonzept und Innovationsgrad

Das Modellprojekt verfolgt mit Blick auf die Herausforderungen des Klimawandels das Ziel, die Daseinsvorsorge in Weinbauregionen durch eine nachhaltige Entwicklung zu stärken. Im Kern geht es um die Frage, ob Agri-PV als Lösung für den Strukturwandel von Weinbauregionen in Zeiten des Klimawandels geeignet ist und die Zukunftsfähigkeit des Weinbaus als Wirtschaftsgrundlage für eine Region in Zeiten des Klimawandels stärken kann. Mit dem Klimawandel leben lernen, bedeutet strukturelle Veränderungen. Diese umfassen insbesondere die Anpassung der Rebsorten, den Schutz der Reben vor negativen Witterungseinflüssen, die Einführung eines nachhaltigen Bewässerungssystems (Firma Schillinger) und den Überflutungsschutz von Siedlungsflächen. Die knappen Personalressourcen in den Gemeindeverwaltungen macht es ländlichen Regionen schwer, diesen mannigfaltigen Herausforderungen des Klimawandels adäquat zu

begegnen. Durch die Kooperation mit einem Forschungspartner wird die Gemeinde Vogtsburg bei der Daseinsvorsorge unterstützt und in ihrer Rolle als Initiator, Partner und Adressat von Forschung, Entwicklung und Innovation gestärkt. Letztlich soll mit den Erkenntnissen aus dem Modellvorhaben praktischer Mehrwert für die Winzer, den Tourismus und die Gemeinde geschaffen und die konkrete Umsetzung weiterer Anlagen vor Ort vorbereitet werden. Da die zwölf anderen Weinbauregionen in Deutschland mit ähnlichen Problemen kämpfen, können hier gewonnene Erkenntnisse und erprobte Lösungswege leicht auf anderen Regionen übertragen und dort weiterentwickelt werden.

Anforderungen an das Agri-PV-System am Standort Vogtsburg sind folgende:

- Schutzfunktion: Optimierte Licht- und Temperatursteuerung der Rebstöcke durch nachgeführte PV-Module, Hagel- und Windschutz, Reduktion des Fungizideinsatzes durch Reduzierung von Nässe und Schutz vor Spätfrost durch leichte Temperaturerhöhung unter den PV-Modulen
- Nachhaltiges Wassermanagement (Ökostrom für den Betrieb von Wasserpumpen zur Bewässerung)
- Hohe Wirtschaftlichkeit: Als Dauerkultur in Reihenbewirtschaftung mit niedriger Durchfahrtshöhe (ca. 3,5 Meter) lassen sich Agri-PV-Systeme im Weinbau kostengünstig umsetzen
- Möglichkeiten zur Digitalisierung des Weinbaus durch die Nutzung des PV-Stroms für autonom fahrende Weinbau-Geräte und Drohnen
- Trinkwasserschutz und Überflutungsschutz: Entwicklung eines Bewässerungssystems, das auf gesammeltes Regenwasser statt auf Trinkwasser setzt
- Neue Möglichkeiten der regionalen Wertschöpfung durch die Produktion von erneuerbarem Strom
- Finanzierungs-, Organisations- oder Geschäftsmodelle mit finanzieller Bürgerbeteiligung bzw. genossenschaftlichen Eigentumskonzepten.

Weitere Ausführungen sind im Anhang B in der bestehenden Projektskizze »Agrarphotovoltaik als Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahme in Weinbauregionen durch Resilienzsteigerung und nachhaltige Bewässerung (APV-WeinReBe)« zu finden.

7.6.2

Machbarkeit

7.6.2.1

Organisatorische und zeitliche Machbarkeit

Arbeitspakete wurden bereits in 7.4.2.1 erläutert.

7.6.2.2

Technische Machbarkeit

Ausführungen zur technischen Machbarkeit sind im Anhang B in der bestehenden Projektskizze zu finden.

7.6.2.3

Wirtschaftliche Machbarkeit

Ausführungen zur wirtschaftlichen Machbarkeit inklusive PV-Ertragssimulation sind im Anhang B in der bestehenden Projektskizze zu finden. Die nachfolgende Tabelle enthält die Gesamtaufstellung der Projektvorkalkulation. Die Begleitforschungsaufwände für das WBI Freiburg sind in 7.4.2.3 inkludiert.

Tabelle 34 Projektkosten-Vorkalkulation für den Standort Vogtsburg.

	Vogtsburg	Winzer	LK Br.- Hochschwarzwald	Schillinger	Gesamt
PM	18	10	18	10	56
Personalkosten /Monat	6.000 €	6.000 €	5.550 €	7.000 €	
Personalkosten gesamt	108.000 €	60.000 €	99.900 €	70.000 €	337.900 €
Materialkosten + Sachleistungen	75.000 €				75.000 €
Reisekosten	3.500 €	2.500 €	2.500 €	3.000 €	11.500 €
Förderquote	90 %	60 %	90 %	60 %	
Kosten APV-Prototyp	157.952 €				157.952 €
Förderbedarf APV-Prototyp	157.952 €				157.952 €
Förderanteil APV-Prototyp	100 %				100 %

7.6.2.4 Risikobewertung

Der Standort ist so gewählt, dass auf Basis des aktuellen rechtlichen Rahmens eine Realisierung gut möglich ist. Die Fläche liegt am Ortsrand, ist Teil eines gültigen Bebauungsplans (Mischgebiet) und befindet sich im Eigentum der Stadt Vogtsburg. Ein Scoping-Termin mit der Unteren Baurechtsbehörde, der Unteren Naturschutzbehörde und der Unteren Wasserrechtsbehörde hat ergeben, dass es keine nennenswerten fachlichen Bedenken gibt.

Der Bau und Betrieb von APV-Anlagen, insbesondere der im Weinbau, ist nach heutigem Kenntnisstand mit erheblichen Risiken verbunden. Dies liegt vor allem an dem frühen Stadium der APV-Technologie sowie an den bisher gänzlich unbekanntem möglichen Nutzeffekten oder Problemen, die sich auf weinbaulicher Seite ergeben. Grundlagenforschung ist für APV im Weinbau in deutschen Gebieten noch nicht vorhanden, daher fehlen entscheidende Daten, Fakten und Hintergrundinformationen für eine mögliche Implementierung. Kein Winzer würde, selbst bei guter finanzieller Förderung, diesen Weg gehen, ohne ein Anschauungsbeispiel vor Ort besichtigen und seine Investitionsentscheidung auf Basis von positiven weinbaulichen Erfahrungen aus praktischen Versuchen fällen zu können. Auch aufgrund des fehlenden Regelrahmens und der damit verbundenen Unsicherheit ist derzeit noch völlig unklar, ob sich tatsächlich ein nennenswerter Markt für APV im Weinbau entwickeln wird.

Das Risiko, dass die Investition in die Entwicklung eines solchen neuen Anlagentyps nur zu einem kleinen Teil durch spätere Einnahmen zurückgezahlt werden kann, ist damit groß. Für die Umsetzung des Forschungsvorhabens ist die Projektgruppe deswegen auf staatliche Förderung angewiesen. Dies gilt auch deshalb, weil eine Förderung auf europäischer Ebene aufgrund des fehlenden Bezugs zu europäischen Themen nicht möglich ist.

- Agrarheute. (2021). *Traktor-Vergleichstest: Größe, Gewicht, Sicht und Licht (Teil 5)*.
<https://www.agrarheute.com/sites/default/files/media/620236/620236.jpg>
- Badelt, O., Niepelt, R., Wiehe, J., Matthies, S. & Haaren, C. von. (2020). *Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE)*.
https://www.researchgate.net/profile/julia-wiehe/publication/346940983_integration_von_solarenergie_in_die_niedersachsische_energielandschaft_inside
- Barden, D., Lempert, F. & Rausch, Matthias, Wiebke, Gerhard. (2013). *INTEGRIERTES KLIMASCHUTZKONZEPT NÖRDLICHER KAISERSTUHL Band 1 – Endingen & Forchheim*. Im Auftrag der Stadt Endingen in Kooperation mit der Gemeinde Forchheim und der Gemeinde Bahlingen.
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., Thompson, M., Dimond, K., Gerlak, A. K., Nabhan, G. P. & Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2(9), 848–855.
<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- BayWa r.e. AG. (2021). *Gemeinsam für mehr Klimaresilienz: Mit Agri-PV Synergien zweier Sektoren nutzen: nachhaltige Nahrungsmittel- und Energieproduktion auf einer Agrarfläche*. <https://www.baywa-re.de/de/agri-pv#unsere-expertise>
- Besson, P., Munoz, C., Ramirez-Sagner, G., Salgado, M., Escobar, R. & Platzer, W. (2017). Long-Term Soiling Analysis for Three Photovoltaic Technologies in Santiago Region. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 7(6), 1755–1760.
<https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2017.2751752>
- Brevis. (2021). <https://www.adama.com/deutschland/de/brevis>
- Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft. (2017, 1. Januar). *Standardlastprofile Strom*. <https://www.bdew.de/energie/standardlastprofile-strom/>
- Cho, J., Park, S. M., Park, A. R., Lee, O. C., Nam, G. & Ra, I.-H. (2020). Application of Photovoltaic Systems for Agriculture: A Study on the Relationship between Power Generation and Farming for the Improvement of Photovoltaic Applications in Agriculture. *Energies*, 13(18), 4815. <https://doi.org/10.3390/en13184815>
- Currle, O. (1983). *Biologie der Rebe: Aufbau, Entwicklung, Wachstum*. Meiningen. *DIN SPEC 91434:2021-05, Agri-Photovoltaik-Anlagen_- Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung*. Berlin. Beuth Verlag GmbH.
- Dittrich, H. (1984). Essigstich-Noch immer Weinfehler Nr. 1. *Der Deutsche Weinbau*, (25/26), 1157–1163.

- Elamri, Y., Cheviron, B., Mange, A., Dejean, C., Liron, F. & Belaud, G. (2018). Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22(2), 1285–1298. <https://doi.org/10.5194/hess-22-1285-2018>
- European Commission. (2021). *PHOTOVOLTAIC GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEM*. https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/#TMY
- Franz Baumgartner (2020, 10. September). *Performance Indices for Double Use Installations of Foldable PV Generators*. ZHAW Zurich University. EUPVSEC IEA Task13 side event, Switzerland, Winterthur.
- Fraunhofer ISE. (2020). *Agri-Photovoltaik: Chancen für Landwirtschaft und Energiewende*.
- Garming, H., Dirksmeyer, W. & Bork, L. (2018). *Entwicklungen des Obstbaus in Deutschland von 2005 bis 2017: Obstarten, Anbauregionen, Betriebsstrukturen und Handel* (Thünen Working Paper), No. 100.
- Goetzberger, A. & Zastrow, A. (1982). On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation. *International Journal of Solar Energy*, 1(1), 55–69. <https://doi.org/10.1080/01425918208909875>
- Handsack, M. (2013). Apfelanbau unter Hagelnetz. *Schriftenreihe des LfULG*(11).
- Hassanpour Adeh, E., Selker, J. S. & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*, 13(11), e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Herrmann, U. (2014). *Der Sieg des Kapitals: Wie der Reichtum in die Welt kam: die Geschichte von Wachstum, Geld und Krisen. Schriftenreihe / Bundeszentrale für Politische Bildung: Bd. 1412*. Bpb Bundeszentrale für Politische Bildung.
- Hilgensloh, M. (2013). *Praxiserfahrungen zum Einsatz von Nützlingen im geschützten Strauchbeerenanbau*. Bundesverband Landwirtschaftlicher Fachbildung e.V. in Zusammenarbeit mit der LVWO Weinsberg. Bundesbeerenobstseminar 2013 an der Staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg,
- Jones, G. (2007). Climate change and the global wine industry. *Proceedings of the 13th Annual Australian Wine Industry Technical Conference, Adelaide*. <http://www.sou.edu/Geography/JONES/AWITC%20GJones.pdf>
- Klodt (2021a). Laubwand-Management als Methode der Reifeverzögerung. *Badischer Winzer* (04).
- Klodt (2021b). Das Potenzial von Hagelschutznetzen. *Badischer Winzer* (07).
- Klophaus, L. & Baab, G. (2015). Apfelanbau unter Hagelnetz. Einfluss verschiedener Hagelnetzfarben auf Wachstum, Ertrag und Fruchtqualität. *Obstbau* (6).
- Knoll, R. (2007). Klima – Typisch? *VINUM*.
- Kriedemann, P. E. & Canterford, R. L. (1971). The Photosynthetic Activity of Pear Leaves (*Pyrus Communis* L.). *Australian Journal of Biological Sciences*, 24(2), 197. <https://doi.org/10.1071/bi9710197>

- Krüger (2015). Bundesverband Landwirtschaftlicher Fachbildung e.V. in Zusammenarbeit mit der LVWO Weinsberg. Bundesbeerenobstseminar 2015 an der Staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg,
- Li-Mallet, A., Rabot, A. & Geny, L. (2016). Factors controlling inflorescence primordia formation of grapevine: their role in latent bud fruitfulness? A review. *Botany*, 94(3), 147–163. <https://doi.org/10.1139/cjb-2015-0108>
- Littek, T., Weinmann, E., Schrieck, P. & Jörger, V. (2011). Das Hagelschutzsystem «Whailex». *ATW-Bericht*, 165.
- Littek, T., Weinmann, E., Schrieck, P. & Jörger, V. (2012). *Neuartiges Hagelschutzsystem: Untersuchungen der Auswirkungen des Schutzsystems auf Ökonomie, Ökologie und Physiologie der Rebe*.
- Malu, P. R., Sharma, U. S. & Pearce, J. M. (2017). Agrivoltaic potential on grape farms in India. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 23, 104–110. <https://doi.org/10.1016/j.seta.2017.08.004>
- Marrou, H., Dufour, L. & Wery, J. (2013). How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system? *European Journal of Agronomy*, 50, 38–51.
- Marrou, H., Guillioni, L., Dufour, L., Dupraz, C. & Wery, J. (2013). Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology*, 177, 117–132. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.04.012>
- MLR Baden-Württemberg. (2021). *Kulturlandschaften erhalten*. <https://mlr.baden-wuerttemberg.de/de/unsere-themen/landwirtschaft/garten-obst-und-weinbau/weinbau/steillagenweinbau/>
- Quatschnig, V. & Hanitsch, R. (1998). Höhere Flächenausbeute durch Optimierung bei aufgeständerten Modulen. *Proceedings of the Symposium Photovoltaische Solar-energie, Staffelstein, Germany*, 11–13.
- R. Fox LVWO Weinsberg (2006). Essigfäule - Ursachen und Gegenmaßnahmen. *Württembergische Weinbautagung* (53).
- Riaz, M. H., Imran, H., Younas, R., Alam, M. A. & Butt, N. Z. (2021). Module Technology for Agrivoltaics: Vertical Bifacial Versus Tilted Monofacial Farms. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 11(2), 469–477. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2020.3048225>
- Rieke, J. & Wöllper, F. (2018). Flächen für Landwirtschaft in den Kreisen Baden-Württembergs. *Statistisches Monatsheft September 2018*, S. 55–59.
- Rollet, C. (2021). *A good year for solar: Agrivoltaics in vineyards*. <https://www.pv-magazine.com/2020/03/31/a-good-year-for-solar-agrivoltaics-in-vineyards/>
- Rupp, D. (2013). *Himbeere im Container – Grundlagen zur Optimierung des Wasser- und Nährstoffangebotes*. Bundesverband Landwirtschaftlicher Fachbildung e.V. in Zusammenarbeit mit der LVWO Weinsberg. Bundesbeerenobstseminar 2013 an der Staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg,
- Schindele, S [S.] & deVries, W. (2020, 14. Oktober). *Cost competitiveness of agrivoltaics. Results of a case study with raspberry farming in the Netherlands*. Agrivoltaics2020 Conference & Exhibition. Conference Contribution, Online Event.

- Schindele, S [Stephan], Trommsdorff, M [Maximilian], Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., Braun, C., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Goetzberger, A. & Weber, E. (2020). Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. *Applied Energy*, 265, 114737. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>
- Schneller, H. (2013). *Nützlichseinsatz bei Sommer- und Herbsthimbeeren im Foliengewächshaus*. m Bundesverband Landwirtschaftlicher Fachbildung e.V. in Zusammenarbeit mit der LVWO Weinsberg. Bundesbeerenobstseminar 2013 an der Staatlichen Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau Weinsberg,
- Sekiyama, T. & Nagashima, A. (2019). Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production: Performance of Agrivoltaic Systems for Corn, A Typical Shade-Intolerant Crop. *Environments*, 6(6), 65. <https://doi.org/10.3390/environments6060065>
- Staatliches Weinbauinstitut Freiburg. (2021). *vitimeteo*. <https://www.vitimeteo.de/>
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. *Anbauflächen aller Kultur- und Nutzungsarten*. <https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Bodennutzung/LF-NutzngKultFrucht.jsp>
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg. *Bodennutzung. Anbauflächen aller Kultur- und Nutzungsarten seit 2010*. <https://www.statistik-bw.de/Landwirtschaft/Bodennutzung/LF-NutzngKultFrucht.jsp>
- Strub, L. (2021). *Welchen Einfluss hat die Mechanisierung auf die Prozesse im Weinbau: Kostenvergleich und Einsparungspotenziale in Steillagen* (ATW-Beratertagung Nr. 46).
- Sun'Agri. (2020). *ARBORICULTURE: LA PUGÈRE: Experimental system over apple trees in the field station of La Pugère*. <https://sunagri.fr/en/project/experimental-system-over-apple-trees-in-the-field-station-of-la-pugere/>
- Thomann, M. & Lang, M. (2008). Was kostet die Erstellung von Apfelneuanlagen? *Obstbau*, (6).
- Trommsdorff, M [Max], Kang, J., Reise, C., Schindele, S [Stephan], Bopp, G., Ehmman, A., Weselek, A., Högy, P. & Obergfell, T. (2021). Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110694. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>
- UM Baden-Württemberg. *Erneuerbare Energien in Baden-Württemberg 2020 – erste Abschätzung*.
- Umweltbundesamt. (2021). *Anpassung: regional und sektoral*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimafolgen-anpassung/anpassung-an-den-klimawandel/anpassung-auf-laenderebene/handlungsfeldlandwirtschaft>
- Urbanietz, A. (2021). Flächendoppelnutzung von Apfelanbau und Photovoltaik - geht das? *Obstbau*, (6).

- 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. *Applied Energy*, 206, 1495–1507. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.09.113>
- VDP. (2020). *DOKTORGARTEN, BLANKENHORNSBERG | VDP.GROSSE LAGE®*. <https://www.vdp.de/de/die-weine/weinbergonline/lage/1058-doktorgarten#map-inline-target>
- Wang, D. & Sun, Y. (2018). Optimizing Light Environment of the Oblique Single-axis Tracking Agrivoltaic System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 170, 42069. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/170/4/042069>
- WBI. (2021). *Weinertrag, Qualität, Flächenbeschaffenheit, Bewirtschaftung, Anforderungen, 2021*.
- Weselek, A., Bauerle, A., Zikeli, S., Lewandowski, I. & Högy, P. (2021). Effects on Crop Development Yields and Chemical Composition of Celeriac (*Apium graveolens* L. var. rapaceum) Cultivated Underneath an Agrivoltaic System. *Agronomy*, 11(4), 733. <https://doi.org/10.3390/agronomy11040733>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S [Stephan] & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4). <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
- Willockx, B., Herteleer, B. & Cappelle, J. (2020). Techno-economic study of agrovoltaic systems focusing on orchard crops. In *EU PVSEC Proceedings*. WIP. <https://lirias.kuleuven.be/3183068?limo=0>

9 Anhang A

**Tabelle A 1 Anforderungsliste für technische Produktentwicklung und Konstruktion;
Projekt: APV im Obstbau - LTZ Augustenberg; (F)= Festforderung; (W)= Wunschforderung; (W) - Prio B = Wunschforderung mit Priorität (B - C).**

Hauptmerkmal	Wesentlich für das Projekt Viti-PV / Anmerkungen / Fragen	Hauptmerkmal	Wesentlich für das Projekt Viti-PV / Anmerkungen / Fragen
Hauptfunktion	Eigenverbrauch (F), Regenschutz (F), Hagelschutz (F), Verschattung (W), automatische Verschattung in Abhängigkeit Pflanzen-Phase (W); Verdunstungsminderung (W); Frostschutz (W)	Fruchtreife	Juli - September: 70 - 80% (Hitzeminderung für bessere Fruchtqualität, Reifesteuerung, Sonnenbrand)
Betriebsart	Überschusseinspeisung (F); Abregelung bei Überschuss (W); Eigenverbrauchsoptimierung (Kühlleistung nach Ernte, August-Oktober) (W)	Ernte	August - September: 60 - 75% (Sonnenbrandschutz, Farbsteuerung) Temperaturdifferenz wichtig
Standort	~0,4 ha PV-Fläche in ~0,8 ha Gesamtfläche; Ebene Fläche, Fläche an Nordseite nicht rechtwinklig; Birnen- u. Apfelplantage; 2 m Erde, dann Stein (Sandstein); Ungleichmäßiger Unterboden (ggf. Stein schon ab 1 m); Wasserleitung in 1 m Tiefe;	Nach Ernte	Oktober - Februar: < 50%; minimal PAR (Stromertrag priorisieren)
Forschungstauglichkeit	1 APV Sektor (Nord), 1 Referenzsektor (Süd) (F); Randeffekte für Probenplätze berücksichtigen (F); Verschiedene Modultypen (siehe "Modulanforderung") (W)	Gewicht	
Geometrie	Durchfahrts Höhe: 3,5 m (F), Maximalhöhe: 4 m (W), Pfahlabstände Nord-Süd, möglichst im Standard: 6 m (W); Pfahlabstände Nord-Süd nicht geringer als 5 m (F); Pfahlabstände Ost-West 3,5 m (F); Pfahltiefe in Boden: möglichst gering (W); Pfähle gerammt eher als geschraubt (W)	Kinematik	Prio-B (Tracker): Neigung PV-Module von +- 60° Grad (Toleranz ~5°) (W); langsam (W); In jede beliebige Lage (W). Wenn Verstellung, dann gleichmäßig für alle Module (W)
Integration in Anbausystem	Netzbefestigung an APV-System/Unterkonstruktion/Module (F); Unterkonstruktion übernimmt Aufgabe von Spindel-Anbausystem (F); Unterkonstruktion innerhalb Pflanzenzeilen (F);	Beanspruchungen	thermische Ausdehnung, Bodensetzungen / Erosion, Windlast (Laubwand und PV), Eislast (Frostberegung); Schneelast, Staub, Pflanzenschutzmittel, Kollision mit Landmaschinen, Sonneneinstrahlung + Hitze, Schnee, Frost / Kälte, Hagel
Anbausystem	(F): Höhe Pflanzen: Winter 3 m, Sommer < 3,5 m, Durchschnitt 3m; Breite Pflanze: 1 m; Pflanzenabstand: 1 m; Zeilenbreite 3,5 m; Zeilenausrichtung: Nord-Süd; durchschnittl. Bodenabstand Laubwand: 0,4 m; Pfahlabstand-Standard 6 m (W); 6-7 m Vorgewende Nord- und Südseite; 1,5 + 7 m Abspannung für Vollübernetzung	Kräfte und Momente	möglichst gering
Pflanzenschutz	Komplettüberdachung, regendicht (F); Hagelüberdachung der Pflanzen mit min. 1,40 m Breite (F)	Energie	Prio-B (Tracker): Bewegung der Module durch Elektromotor (keine Handkräfte) (F); Antriebsstrom lokal aus kleiner PV+Nötfallbatterie (W)
Anbauzyklus	Neubepflanzung alle 15 Jahre (F)	Werkstoffe/ Hilfsstoffe	Stahlpfähle (F)
Bearbeitung	Laubschnitt, Ernte an beide	Ergonomie	Zugänglichkeit für Monta-

	Laubwandseiten, überwiegend manuell; Manuelle Überzeilenarbeiten (Baumschnitt) (F); März bis September ~20 Behandlungen mit Pflanzenschutzmitte (F);		ge+Wartung/Reinigung (F); Prio-B (Tracker): Ansteuerung Elektromotor(en) vor Ort an der Anlage (W). Schalter für verschiedene Positionen (W);
Konstruktion	Querverstrebt/Querverspannt (W); Beachtung von: Bauprodukte-Verordnung (EU) 305/2011 - speziell »DIN 18008 Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln«, Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU (F)	Nutzung	Außenbewitterung, Nutzungsdauer 20 Jahre (F)M; je länger umso besser (W); Instandhaltungskosten möglichst gering (W)
Wassermanagement	Erosion durch Abtropfkanten möglichst gering (W); Regenwassernutzung für Bewässerung (W) - Prio B ;	Sicherheit/ Schutzmaßnahmen	Maschinenrichtlinie; Module müssen für Überkopfverglasung zugelassen (F); Baugenehmigung notwendig, Privilegierung nach § 35 BauGB Angestrebt (F)
Spezielle Reinigungsanforderung	Integration von Bewässerung und Modul-Reinigung (W) - Prio C	Fertigung	Bauteilfertigung; möglichst Katalogteile / Normteile für Wartung und Reparatur, ...
Lichtmanagement	Jahresdurchschnitt: Schätzung anhand GCR => Ziel 36%;	Montage/ Demontage	Empfehlung: Installation über den Bäumen => Kran auf Wegen neben APV-Fläche (Spannweite ~ 50 Meter!) oder Baustellenmontage mit Hebebühne zwischen Baumreihen Integration der UK in Spindel-Anlage (bereits vor APV-Anlage) (F) Rückbaumöglichkeit - Pfostenplätze wieder bepflanzen (F)
PAR-Definition	PAR als Durchschnitt über vertikaler Laubwandkontur (F); PAR als Durchschnitt über vertikaler Laubwandkontur mit Angabe von unterem und oberem Punkt (W); Vorgewende und Seitenabstände von Anbauflächen können entsprechend stärker verschattet sein (W);	Instandhaltung	Reinigung, speziell nach Pflanzenschutzausbringung: manuell (F) - automatisch (W), Zugänglichkeit (W) (siehe "Integration in Anbausystem")
Hagelnetz	(F): Netz wird ab Mitte-Ende April nach Blüte bis zur Ernte aufgespannt/ausgerollt; Volleinnetzung: 3 x 7 mm Maschenweite Oberseite (Wanzennetz), 15% zusätzliche Verschattung (bei Kristallnetz 8%, 15% bei grauem Netz bzw. nachgefärbtem Kristallnetz) (F); Spannkraft: 80 kg Last an Plaketten (Sollbruchstellen) je 1,5 Meter über der Fahrgasse (zwischen Pflanzenzeilen) (F); 0,8 mm ² Maschenweite an Seitenteile der Volleinnetzung (Insektenschutz), Verschattung: ~ 60 - 70% (F);	Kontrolle	Monitoring (W)
Modulanforderung	2 verschiedene Modultypen (Nord-Sektor - Modultyp 1, Südsektor Modultyp 2) (W); Semitransparent (W);	Kommunikation	Erfassung Ist-Zustand, lokaler Datenlogger (F); alternativ: Sensorsystem fest verkabelt (W) (Stromzuleitung der PV-Module zum Netzanschluss muss sowieso gemacht werden).
Nachführung	Tracking für Lichtmanagement nach Wachstumsphase (W)	Transport	Sattelzug-Zufahrt möglich
Verschattungsgleichmäßigkeit	Innerhalb der Zeilen gleichmäßig (F); Unterschiede zwischen unterschiedlichen Zeilen vermeiden (W)	Nachhaltigkeit	Fundamente mit Spinnanker o.ä., kein Beton für Fundamente wegen besserer Rückbaubarkeit + geringerem Aufwand an grauer Energie (F)
Wachstumsperioden PAR_{min}:	Durchschnittlich min. 70% PAR (W)	Recycling	

Spätfrost / Austrieb	März: 60% (Austrieb verzögern), außerdem Wärmeabstahlung weniger wegen PV-Dach bei Tracker; ggf. zusätzlich Flies	Kosten	... €/kWp
Trockenstress / Spätfrost / Blütenausdünnung	April: 70 - 80% (Verdunstungsminderung, Blütenausdünnung, Triebzuwachs)	Stückzahlen, Produktzyklus	
Zellteilungsphase / Blütenausbildung	Mai: 75%; kritische Phase	Termine	(W): Installation nach Ernte bei Trockenheit; Bei Kupfereinsatz (Pflanzenschutz) 2 Woche Anlagensperre (F); Unterkonstruktion in Anbausystem schon Oktober 2021 - da Bäume schon stehen und wachsen (W);
Junifruchtfall / Fruchtausdünnung	Juni: 70% Verschatten (Ausdünnung); ggf. Netz unter Module ziehen, falls flexibel	Markt / Wettbewerb	

Tabelle A 2 Anforderungsliste für technische Produktenentwicklung und Konstruktion Projekt Viti-PV: PV-Tracker im Weinbau; (F)= Festforderung; (W)= Wunschforderung; (W) - Prio B = Wunschforderung mit Priorität (B - C).

Hauptmerkmal	Wesentlich für das Projekt Viti-PV / Anmerkungen / Fragen	Hauptmerkmal	Wesentlich für das Projekt Viti-PV / Anmerkungen / Fragen
Hauptfunktion	Eigenverbrauch (F), automatische Verschattung in Abhängigkeit Pflanzen-Wachstumsphase / Reiferverzögerung (F); Verdunstungsminderung (W); Hagelschutz (W - Prio C); Regenschutz (W - Prio C)	Nach Ernte	< 50% PAR; minimal PAR (Stromertrag priorisieren)
Betriebsart	Überschusseinpeisung (F); Eigenverbrauchsoptimierung (Kühlleistung nach Ernte, September-Oktober) (W)	Gewicht	Der Statik dienlich; Anforderung anhand Bodenbeschaffenheit?
Standort	~0,25 ha PV-Fläche in ~0,5 ha Gesamtfläche; Geländegefälle variierend bis 15% - Weinberg; West-Ausrichtung; Fläche nicht rechtwinklig; Fläche ggf. uneben; Vulkanerde, skelettreich und ggf. felsig (hohe Verdunstungsrate); Uneinheitlicher Boden - Böschung wurde in 70er Jahren aus Norden in den Süd-Westen geschoben (Planierung).	Kinematik	Neigung PV-Module von +- 60° Grad (Toleranz ~5°) (W); langsam (W); In jede beliebige Lage (W). Wenn Verstellung, dann gleichmäßig für alle Module (F)
Akzeptanzanforderungen	Möglichst unauffälliges Erscheinungsbild (F)	Kräfte und Momente	möglichst gering (W)
Forschungstauglichkeit	Aufteilung in 2 APV Streifen (F), Aufteilung in 4 APV Streifen (W), Referenzstreifen homogen dazwischen angeordnet; Ein Streifen überspannt x Rebenreihen, wobei mittlere Reihen zur Auswertung dienen (F)	Energie	Bewegung der Module durch Elektromotor (keine Handkräfte) (F); Antriebsstrom lokal aus kleiner PV+Notfallbatterie (W)
Geometrie	Durchfahrthöhe 4 m (F), Maximalhöhe 5 m (W), Pfahlabstände Ost-West, möglichst im Standard: X x 5 m (W); Pfahlabstände Nord-Süd nicht geringer als 6 m (F); Pfahl nicht in Fels (W); Pfähle gerammt eher als geschraubt (W); Maximaler Pfahldurchmesser: 0,3 m (F); Min. 2/3 der Fläche sind Vollerter- und Laubschnittmaschinen-tauglich (F)	Beanspruchungen	thermische Ausdehnung, Bodensetzungen / Erosion, Korrosion der Pfähle im Boden, Windlast (Laubwand und PV) (F); höher Windzone 4 - doppelte Windgeschwindigkeit wie im Tal durch Kessellage berücksichtigen (3-Jahreshöchstwerte: 17 m/s Tal: Niederrotweil; 21 m/s Blankenhornsberg geschützt, bodennah) min. 35 m/s Bemessungswert (F), Schneelast, Staub, Pflanzenschutz-

			mittel, Kollision mit Landmaschinen, Sonneneinstrahlung + Hitze, Schnee, Frost / Kälte, Hagel
Integration in Anbausystem	Unterkonstruktion übernimmt Aufgabe von Drahtrahmen-Anbausystem (F); Unterkonstruktion innerhalb Pflanzenzeilen in Drahtrahmensystem (F); So viel Rebzeilen wie möglich überspannen, falls Überspannung vorgesehen (W)	Ergonomie	Ansteuerung Elektromotor(en) vor Ort an der Anlage (F). Schalter für verschiedene Positionen (F); Zugänglichkeit für Montage+Wartung/Reinigung (F)
Anbausystem	(F): Breite Pflanzen: 0,30 m; Höhe Pflanzen: 2,30 m; Zeilenabstand 2 m; Zeilenausrichtung: Ost-West; Bodenabstand Laubwand: 0,8 m; Traubenzone: 0,8 - 1,2 m;	Sicherheit/ Schutzmaßnahmen	Maschinenrichtlinie; Module müssen für Überkopfverglasung zugelassen sein (F); Baugenehmigung notwendig, Privilegierung nach § 35 BauGB Angestrebt (F)
Pflanzenschutz		Werkstoffe/ Hilfsstoffe	Stahlpfähle (F)
Anbauzyklus	>>20 Jahre Neupflanzung	Nutzung	Weinberg, Außenbewitterung, Nutzungsdauer 20 Jahre (F), je länger umso besser (W), Instandhaltungskosten möglichst gering (F)
Bearbeitung	Beidseitige maschinelle Bearbeitungsmöglichkeit der Rebzeilen (F); maschinelle Überzeilenarbeit (W); Stein-schlag durch Bodenbearbeitung möglich (W); Befahrbarkeit aller Rebzeilen sicherstellen (Abspannung, etc. beachten) (F)	Fertigung	Bauteilfertigung; möglichst Katalogteile / Normteile für Wartung und Reparatur, ...
Konstruktion	Querverstreb/Querverspannt (W); Beachtung von: Bauprodukte-Verordnung (EU) 305/2011 - speziell »DIN 18008 Glas im Bauwesen - Bemessungs- und Konstruktionsregeln«, Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU (F)	Montage/ Demontage	Baustellen-Montage innerhalb Reihe; Geländegefälle bis zu 15% (F) Empfehlung: Montage mit Fahrbarer Hebebühne zwischen Rebzeilen Festlegung der finalen Pfahlstandorte kann direkt geschehen, da Reben schon stehen (F) Rückbaumöglichkeit - Pfostenplätze wieder bepflanztbar (F)
Wassermanagement	Erosion durch Abtropfkanten möglichst gering (W); Regenwassernutzung für Tropfbewässerung (W) - Prio B ;	Instandhaltung	Reinigung, speziell nach Pflanzenschutzausbringung: manuell (F) - automatisch (W), Zugänglichkeit (W) (siehe "Integration in Anbausystem")
Spezielle Reinigungsanforderung	Integration von Bewässerung und Modul-Reinigung (W) - Prio C	Kommunikation	Erfassung Ist-Zustand der Modulneigung, lokaler Datenlogger (F); alternativ: Sensorsystem fest verkabelt (W) (Stromzuleitung der PV-Module zum Netzanschluss muss sowieso gemacht werden).
Lichtmanagement		Kontrolle	Monitoring (W)
PAR-Definition	PAR als Durchschnitt über vertikaler Laubwandkontur (F);	Transport	Hubschrauber; Kran wahrscheinlich nicht möglich; Kurven für Hänger zu eng (Zuwege planieren); Kein Sattelzug; Zufahrtweg über Ost-Seite des Berges

Hagelnetz	(W) - Prio C: Optional für Erfüllung Hagelschutz unabhängig von Modulbreite: 10% zusätzliche Verschattung durch Kristallnetz; Bei Überspannung: Spannkraft - maximal 80 kg an Plaketten (Sollbruchstellen) je 1,5 Meter über der Fahrgasse (zwischen Pflanzenzeilen)	Nachhaltigkeit	Fundamente mit Spinnanker o.ä., kein Beton für Fundamente wegen besserer Rückbaubarkeit + geringerem Aufwand an grauer Energie (F)
Modulanforderung	Semitransparent (W);	Recycling	
Nachführung	Tracking für Lichtmanagement nach Wachstumsphase (F); Tracking für Lichtmanagement nach Wettervorhersage, Schlechtwetterphase (W); Senkrechte, wenn Regen, außer im Sommer (W);	Termine	(W): Umstrukturierung der Fläche mit zeitl. Abstand vor Anlagengerichtung (Abschluss Februar); APV ggf. März 2022 (wenn Verzögerung Rebepflanzung vor APV Installation, wenn möglich)
Verschattungsgleichmäßigkeit	Innerhalb der Zeilen gleichmäßig (F); Unterschiede zwischen unterschiedlichen Zeilen vermeiden (W)	Stückzahlen, Produktzyklus	da hier ein Prototyp gebaut werden soll, bei dem noch unklar ist, ob es Nachfolgeprojekte gibt, würde die Entwicklung eher nicht in Richtung Massenproduktion gehen
Wachstumsperioden anhand BBCH Mikrostadien - PAR_{min}:	Alle (F)	Kosten	... €/kWp für das Projekt; separate Entwicklungskosten:
BBCH < 53: Vor der Blüte	Bis zu > 60% PAR möglich	Markt / Wettbewerb	
BBCH 53 - 69: Geschein / Blüten	Mindestens 80% PAR (ertragsbestimmende Knospentbildung priorisieren)	Schutzrechte, Patente	
BBCH 71 - 89: Fruchtreife (Säureabbau, Aromabildung)	70 - 80% PAR (gezielte Reifeverzögerung)		

Tabelle A 3 Gantt-Diagramm Standort Bavendorf.

	2021		2022				2023				2024	
	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3
AP												
1 Konzeption und technische Implementierung der Agri-PV-Anlage												
1.1 Entwurf Agri-PV-Anlagendesign												
1.2 Entwicklung Unterkonstruktion												
1.3 Entwicklung Wassermanagement												
1.4 Stromabnahme/-netzanschluss												
1.5 Installation												
1.6 Betriebsführung												
2 Agrarwissenschaftliche Begleitforschung												
2.1 Ertragsqualität und -quantität												
2.2 Monitoring Mikroklima und Schaderregerbefall												
2.3 Weitere agrarwissenschaftliche Analysen												
3 Ökonomie und energetische Bewertung												
3.1 Datenerhebung über Anschaffungskosten für geschützte Systeme												
3.2 Datenerhebung über Materialkosten Agri-PV												
3.3 Betriebskostenanalyse												
3.4 Wirtschaftlichkeitsanalyse												

Tabelle A 4 Gantt-Diagramm Standort Augustenberg.

Anhang A

	2021		2022				2023				2024		
	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	
AP													
AP 1.1 Koordination Teilprojekt													
1.1 Koordination Teilprojekt Standort Augustenberg													
1.3 Zusammenarbeit Rahmenprogramm und Bürgerbeteiligung													
2 Konzeption und technische Implementierung der Agri-PV-Anlage													
2.1 Systemdesign: Strahlungssimulation und Ertragsprognose													
2.2 Entwicklung Unterkonstruktion													
2.3 Genehmigungsverfahren und Aspekte der Raumplanung													
2.4 Stromabnahme und Netzanschluss													
2.5 Installation Demoanlagen													
2.6 Monitoring und technische Betriebsführung													
AP 3.3. Agrarwissenschaftliche Analysen													
3.1 Design und Auswertung der agrarwissenschaftlichen Analysen													
3.2 Monitoring Mikroklima, Baumgesundheit und Schaderregerbefall													
3.3 Erhebungen von Ertrag und Qualität (inkl. Lager)													
AP 4 Berichterstattung													
4.1 Zwischenbericht													
4.2 Abschlussbericht													

Tabelle A 5 Gantt Diagramm Standort Heuchlingen.

	2021		2022				2023				2024		
	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	
AP													
1 Konzeption und technische Implementierung der Agri-PV-Anlage													
1.1 Entwurf Agri-PV-Anlagendesign													
1.2 Entwicklung Unterkonstruktion													
1.3 Entwicklung Wassermanagement													
1.4 Stromabnahme/-netzanschluss													
1.5. Genehmigungsverfahren und Aspekte der Raumplanung													
1.6 Installation													
1.7 Bestückung der Anlage mit verschiedenen Beerenkulturen													
1.8 Betriebsführung													
2 Agrarwissenschaftliche Begleitforschung													
2.1 Ertragsqualität und -quantität Erdbeeren													
2.2 Ertragsqualität und -quantität strauchbeeren													
2.3 Monitoring Mikroklima und Schaderregerbefall													
2.4 Substrattestung													
2.5 Versuchsbereich Wassermanagement und Wasseraufbereitung													

Tabelle A 7 Gantt-Diagramm Teilprojekt Ackerbau Teil II.

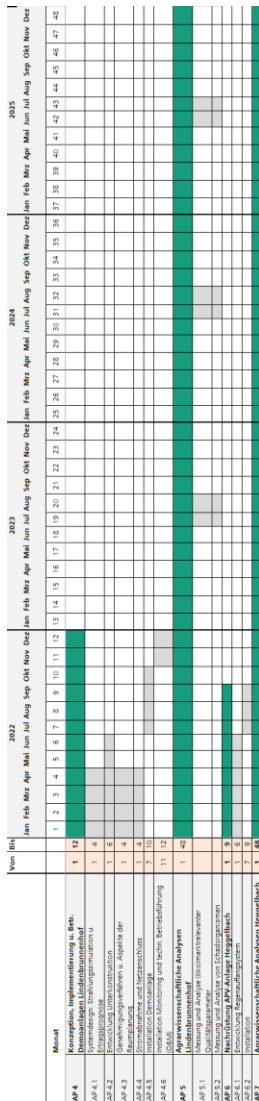


Tabelle A 8 Risikobewertung für die Standorte Ihinger Hof, Lindenbrunnenhof und Hofgemeinschaft Heggelbach, grün steht für ein geringes Risiko, orange für ein mittleres Risiko und rot für ein hohes Risiko.

	Ihinger Hof	Lindenbrunnenhof	Hofgemeinschaft Heggelbach
Baugenehmigung	Red	Yellow	
Technische Realisierbarkeit des Anlagenbaus	Yellow	Yellow	
Akzeptanz durch die Bevölkerung	Green	Green	(Anlage bereits vorhanden)
Gutachten (Umwelt-, Boden-, und Blendschutzgutachten, Windlastenprüfung)	Green	Green	

Tabelle A 9 Gantt-Diagramm Teilprojekt Weinbau.

	2021		2022				2023				2024		
	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	
AP													
1 Koordination Teilprojekt													
1.1 Koordination Teilprojekt Standort Staatsweingut Freiburg													
1.2 Koordination Teilprojekt Standort Oberkirch-Bottenau													
1.3 Koordination Teilprojekt Standort Vogtsburg													
1.3 Zusammenarbeit Rahmenprogramm und Bürgerbeteiligung													
2 Konzeption, Implementierung und Betrieb Demoanlagen													
<i>2.1 Systemdesign: Strahlungssimulation und Ertragsprognose</i>													
2.1.1 Staatsweingut Freiburg													
2.1.2 Oberkirch-Bottenau													
2.1.3 Vogtsburg													
<i>2.2 Entwicklung Unterkonstruktion</i>													
2.2.1 Staatsweingut Freiburg													
2.2.2 Oberkirch-Bottenau													
2.2.3 Vogtsburg													
<i>2.3 Genehmigungsverfahren und Aspekte der Raumplanung</i>													
2.3.1 Staatsweingut Freiburg													
2.3.2 Oberkirch-Bottenau													
2.3.3 Vogtsburg													
<i>2.4 Stromabnahme und Netzanschluss</i>													
2.4.1 Staatsweingut Freiburg													
2.4.2 Oberkirch-Bottenau													
2.4.3 Vogtsburg													
<i>2.5 Installation Demoanlagen</i>													
2.5.1 Staatsweingut Freiburg													
2.5.2 Oberkirch-Bottenau													
2.5.3 Vogtsburg													
<i>2.6 Installation Monitoring und technische Betriebsführung</i>													
2.6.1 Staatsweingut Freiburg													
2.6.2 Oberkirch-Bottenau													
2.6.3 Vogtsburg													
<i>2.7 Energiekonzept</i>													
2.7.1 Staatsweingut Freiburg													
2.7.2 Oberkirch-Bottenau													
2.7.3 Vogtsburg													
3. Agrarwissenschaftliche Analysen													
<i>3.1 Versuchsplanung, Experiment Design, Organisation und Installation der Messeinheiten</i>													
3.1.1.1 Pflanzenbauliche Datenerfassung - Staats-													

1 0

Anhang B



Projektskizze

Agrarphotovoltaik als Klimaschutz- und Klimaanpassungsmaßnahme in Weinbauregionen durch Resilienzsteigerung und nachhaltige Bewässerung (APV-WeinReBe)

Skizzeneinreicher: Stadt Vogtsburg im Kaiserstuhl
 Bürgermeister Benjamin Bohn
 Bahnhofstraße 20
 79235 Vogtsburg im Kaiserstuhl

Telefonnummer: 07662 812-0
 E-Mail-Adresse: bohn@vogtsburg.de
 Projektlaufzeit: 01.04.2021 – 31.03.2024

Fördersumme: 998.152 €

Projektpartner:

Projektpartner	Rolle	Anschrift	Organisationstyp	Ansprechpartner	E-Mail / Telefon
Stadt Vogtsburg	Projektkoordinator	Bahnhofstraße 20 79235 Vogtsburg im Kaiserstuhl	Kommune	Bürgermeister Benjamin Bohn	bohn@vogtsburg.de 07662 812-0
Fraunhofer ISE	Projektpartner	Heidenhofstr. 2 79106 Freiburg	Forschungseinrichtung (FE)	Max Trommsdorff	maximilian.trommsdorff@ise.fraunhofer.de +49 761 4588-5651
Staatliches Weinbauinstitut Freiburg (WBI)	Projektpartner	Merzhauser Str. 119 79100 Freiburg	Forschungseinrichtung (FE)	Dr. Rolf Steiner	rolf.steiner@wbi.bwl.de 0761 40165-9101
Landratsamt Breisgau-Hochschwarzwald	Projektpartner	Stadtstraße 2 79104 Freiburg	Kommune	Frau Barden	sabine.barden@lkbh.de 0761 2187-5314
Weinbaubetrieb	Projektpartner			noch in Verhandlung	
Bewässerungsunternehmen	Projektpartner			noch in Verhandlung	

Zusammenfassung des Vorhabens

Der fortschreitende Klimawandel bereitet dem Weinbau am Kaiserstuhl zunehmend Probleme. Hitze und Dürre führen wie in anderen Weinbauregionen Deutschlands zu Ernte- und Qualitätseinbußen. Da der Weinbau die Kulturlandschaft prägt, ist er gleichzeitig Basis für den Tourismus, der wie auch in anderen Weinbauregionen eine wichtige Säule der Wirtschaft bildet. Deshalb will die Stadt Vogtsburg Wege finden, um den Weinbau auch in Zeiten des Klimawandels zu erhalten. Dazu soll Agrophotovoltaik (APV) erstmals in Deutschland im Weinbau eingesetzt werden. Die PV-Module dienen zum einen als Schattenspender für die Rebstöcke, um bei diesen einen Sonnenbrand und zu hohe Oechslegrade zu vermeiden, zum anderen soll der erneuerbare Strom im Sinne der Kreislaufwirtschaft vor Ort für Pumpen zur Bewässerung der Reben eingesetzt werden. Das Projekt beinhaltet zudem eine bilanzielle Betrachtung der Auswirkungen der PV-Module auf den Wasserhaushalt. Perspektivisch soll die APV genutzt werden können, um gleichzeitig einen Beitrag zur Sicherung der Wasserversorgung und zum Überflutungsschutz zu leisten. Mit dem gewonnenen Strom kann Wasser aus Regenwasserreservoirs in die Weinberge gepumpt werden.

Das Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme konzipiert und baut die APV-Anlage in einem Weinberg. Das Weinbauinstitut des Landes prüft die Wirkungen der APV-Anlage aus agrarwissenschaftlicher Sicht. Ein Winzer stellt Rebflächen bereit und produziert Wein, der auf seine Qualität geprüft wird. Ein Bewässerungsunternehmen bringt sein Knowhow bei der Konzeption der Bewässerung und beim Aufbau der Pilotanlage ein. Das Landratsamt begleitet den Prozess, insbesondere mit Blick auf genehmigungsrechtliche Fragen.

Das Projekt dient der nachhaltigen Daseinsvorsorge, indem es zahlreiche positive Beiträge leistet: zum Klimaschutz durch den Einsatz erneuerbarer Energie, zur Kreislaufwirtschaft durch die Nutzung des PV-Stroms vor Ort, zum sparsamen Umgang mit Rebflächen durch deren Doppelnutzung, zum Ressourcenschutz durch Trinkwasserschonung und erschließt gleichzeitig neue regionale Wertschöpfung in Form von Stromgewinnung, bei der auch Formen der Bürgerbeteiligung denkbar sind. Der PV-Strom kann auch zur Digitalisierung des Weinbaus genutzt werden (autonome Geräte und Drohneneinsatz). Auch die Vernetzung der relevanten Akteure vor Ort wie Bürgerenergiegenossenschaft, Betriebe aus Tourismus und Weinbau sowie die Kommune wird gestärkt. Die APV wird somit multifunktional für die nachhaltige Entwicklung einer Region eingesetzt, die bedingt durch den Klimawandel vor einem Strukturwandel steht. Bei der Realisierung sind genehmigungsrechtliche Aspekte zu berücksichtigen. Auch die Themen Wirtschaftlichkeit, Akzeptanz vor Ort und Nutzung für das Tourismusmarketing spielen eine wichtige Rolle. Das Ergebnis ist die Erstellung eines Praxisleitfadens, der Kommunen in anderen Weinbauregio-

nen Deutschlands dazu befähigen soll, APV-Projekte vor Ort umzusetzen. Hierdurch kann das Projekt durch seine überregionale Wirkung zur Resilienzsteigerung im Weinbau in ganz Deutschland beitragen.

Ausgangssituation

Der Kaiserstuhl ist eine der wärmsten Regionen Deutschlands und wird daher traditionell für den Weinbau genutzt. Die durch Weinberge geprägte Kulturlandschaft bildet zusammen mit dem Produkt Wein die Grundlage für den Tourismus am Kaiserstuhl und die Wirtschaft der Region.

Die Stadt Vogtsburg (ca. 6.000 Einwohner) ist mit 1.400 Hektar Rebfläche die flächengrößte weinbaubetreibende Gemeinde in Baden-Württemberg. Es gibt sechs Winzergenossenschaften und ca. 40 Weingüter. 23 Beherbergungsbetriebe konnten 2019 66.411 Übernachtungen verbuchen.

2013 ging in Vogtsburg die damals größte Freiflächen-PV-Anlage Baden-Württembergs in Betrieb, die größtenteils im Besitz einer Bürgerenergiegenossenschaft ist. Es ist davon auszugehen, dass deshalb in Vogtsburg die Akzeptanz von PV hoch ist.

Problemstellung

In den letzten Jahren ist der Kaiserstuhl zunehmend und in mehrfacher Hinsicht von den Herausforderungen des Klimawandels betroffen. Steigende Sonneneinstrahlung und Hitzeperioden führen zu Ertrags- und Qualitätseinbußen – u. a. in Form von Sonnenbrand und Rosinierung. Gleichzeitig führen Hitze und Dürre vermehrt zu Wassermangel. Um Dürreschäden zu vermeiden, wird am Kaiserstuhl immer häufiger die Tröpfchenbewässerung eingesetzt, wobei meist auf Trinkwasser zurückgegriffen wird.

Andererseits steigt die Gefahr von Starkregen, wodurch manche Ortsteile von Vogtsburg bereits mehrfach überflutet wurden und in den Hanglagen der Bodenabtrag zunimmt.

Wenn es nicht gelingt, die Zukunft des Weinbaus zu sichern, sind auch die Gewerbestruktur vor Ort und der Tourismus als wichtiges Wirtschaftsstandbein der Region gefährdet.

Strukturelle Veränderungen und Zielsetzung

Das Modellprojekt verfolgt mit Blick auf die Herausforderungen des Klimawandels das Ziel, die Daseinsvorsorge in Weinbauregionen durch eine nachhaltige Entwicklung zu stärken. Im Kern geht es um die Frage, ob APV als Lösung für den Strukturwandel von Weinbauregionen in Zeiten des Klimawandels geeignet ist und die Zukunftsfähigkeit des Weinbaus als Wirtschaftsgrundlage für eine Region in Zeiten des Klimawandels stärken kann. Mit dem Klimawandel leben lernen, bedeutet struk-

turelle Veränderungen. Diese umfassen insbesondere die Anpassung der Rebsorten, den Schutz der Reben vor negativen Witterungseinflüssen, die Einführung eines nachhaltigen Bewässerungssystems und den Überflutungsschutz von Siedlungsflächen.

Die knappen Personalressourcen in den Gemeindeverwaltungen macht es ländlichen Regionen schwer, diesen mannigfaltigen Herausforderungen des Klimawandels adäquat zu begegnen. Durch die Kooperation mit einem Forschungspartner wird die Gemeinde Vogtsburg bei der Daseinsvorsorge unterstützt und in ihrer Rolle als Initiator, Partner und Adressat von Forschung, Entwicklung und Innovation gestärkt.

Letztlich soll mit den Erkenntnissen aus dem Modellvorhaben praktischer Mehrwert für die Winzer, den Tourismus und die Gemeinde geschaffen und die konkrete Umsetzung weiterer Anlagen vor Ort vorbereitet werden. Da die zwölf anderen Weinbauregionen in Deutschland mit ähnlichen Problemen kämpfen, können hier gewonnene Erkenntnisse und erprobte Lösungswege leicht auf anderen Regionen übertragen und dort weiterentwickelt werden.

Konzeptioneller Ansatz und Lösungsweg

Die APV kombiniert Landwirtschaft und Stromproduktion durch Photovoltaik-Module auf derselben Fläche. Bisher gibt es in Deutschland erste Projekte im Ackerbau und im Obstbau. Forschungsergebnisse aus Deutschland und Frankreich legen ein besonders hohes Potenzial im Weinbau nahe. Gründe hierfür sind:

- Schutzfunktion: Optimierte Licht- und Temperatursteuerung der Rebstöcke durch nachgeführte PV-Module, Hagel- und Windschutz, Reduktion des Fungizideinsatzes durch Reduzierung von Nässe und Schutz vor Spätfrost durch leichte Temperaturerhöhung unter den PV-Modulen,
- Nachhaltiges Wassermanagement (Ökostrom für den Betrieb von Wasserpumpen zur Bewässerung),
- Hohe Wirtschaftlichkeit: Als Dauerkultur in Reihenbewirtschaftung mit niedriger Durchfahrts Höhe (ca. 3,5 m) lassen sich APV-Systeme im Weinbau kostengünstig umsetzen,
- Möglichkeiten zur Digitalisierung des Weinbaus durch die Nutzung des PV-Stroms für autonom fahrende Weinbau-Geräte und Drohnen,
- Trinkwasserschutz und Überflutungsschutz: Entwicklung eines Bewässerungssystems, das auf gesammeltes Regenwasser statt auf Trinkwasser setzt,
- Neue Möglichkeiten der regionalen Wertschöpfung durch die Produktion von erneuerbarem Strom,

- Finanzierungs-, Organisations- oder Geschäftsmodelle mit finanzieller Bürgerbeteiligung bzw. genossenschaftlichen Eigentumskonzepten.

Vorhabenstruktur

Die Stadt Vogtsburg ist Antragsteller und Projektkoordinator. Zur wissenschaftlichen Begleitung kooperiert sie mit den Fraunhofer ISE mit Sitz in Freiburg, das die APV-Anlage konzipiert und baut. Der Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald stellt die Verbindung zu den relevanten Genehmigungsbehörden her und unterstützt bei der Erstellung des Praxisleitfadens. Der noch auszuwählende Weinbaubetrieb pflegt die Reben und produziert den Wein, das Weinbauinstitut führt das agrarwissenschaftliche Monitoring zu den Auswirkungen der APV auf die Pflanzen und deren Ernteertrag im Vergleich zu einer Referenzfläche durch. Der Bewässerungsspezialist erarbeitet in Kooperation mit dem Fraunhofer ISE ein nachhaltiges Bewässerungssystem mit Regenwassernutzung, das über PV-Strom betrieben wird.

Kurzdarstellung der beteiligten Einrichtungen (und ggf. relevante Auftragsvergaben)

Stadt Vogtsburg: Die Stadt besitzt nennenswerte kommunale Rebflächen. Sie lässt ein Strukturgutachten erstellen mit dem Ziel, die bestehende Wasserversorgungsinfrastruktur fit für die Zukunft zu machen. Die Stadt betreibt umfangreiches Tourismusmarketing. Mit der Realisierung des seinerzeit größten Solarparks Baden-Württembergs in überwiegend genossenschaftlichem Besitz haben die Stadt Vogtsburg und ihre Bürgerschaft ihre Innovationsbereitschaft und -fähigkeit bewiesen.

Landkreis: Die Stadt Vogtsburg gehört zum Landkreis Breisgau-Hochschwarzwald. Der Landkreis hat ca. 264.000 Einwohner und ist gekennzeichnet durch seine ländliche Struktur. 32 der 50 Städte und Gemeinden haben weniger als 5.000 Einwohner. Die größte Stadt ist Bad Krozingen mit ca. 20.500 Einwohnern. Mehr als die Hälfte der Mitgliedsgemeinden sind Weinbaugemeinden. Der Landkreis, der gleichzeitig Genehmigungsbehörde für Wasserrecht, Baurecht und Naturschutzrecht ist, wirkt an der Erarbeitung eines Leitfadens mit, der Checklisten und Empfehlungen für genehmigungsrechtlich relevante Aspekte enthält und – insbesondere mit Blick auf das Landschaftsbild - Empfehlungen für die Standortsuche gibt.

Fraunhofer ISE: Mit etwa 1.200 Mitarbeitern ist das Fraunhofer ISE das größte Forschungsinstitut für Solarenergie in Europa. Als Urheber der APV-Idee verfügt das Fraunhofer ISE über mehr als zwölf Jahre Erfahrung in dualen Landnutzungsanwendungen für Landwirtschaft und PV-Stromerzeugung und hat mehrere Lichtmanagement- und Strahlungssimulationen zur Verschattungsoptimierung, Machbarkeitsstudien und F&E-Dienstleistungen zu dem Thema durchgeführt. Hydrologische Fragestellungen wird das ISE im Unterauftrag klären.

Weinbaubetrieb: Ein Weinbaubetrieb stellt eine Rebfläche von mindestens 1.500 m² für das Modellprojekt und eine entsprechende Referenzfläche zur Verfügung, bringt sein Fachwissen und seine Arbeitskraft für deren Bewirtschaftung ein und produziert Wein aus den Reben. In ersten Gesprächen wurde ein sehr hohes Interesse bei den Winzern deutlich. Konkrete Flächen sind bereits angedacht und wurden von den Genehmigungsbehörden als grundsätzlich geeignet bewertet. In der Projektskizze wird noch keine Fläche benannt, da der Bewerbungs- und Auswahlprozess noch nicht abgeschlossen ist.

WBI: Das 1920 gegründete staatliche Weinbauinstitut Freiburg verfolgt das Ziel einer praxisorientierten Forschung im Weinbau und der Oenologie. Schwerpunkte seiner Arbeit liegen dabei unter anderem auf der Entwicklung und Prüfung neuer Verfahren im Weinbau, dem Rebschutz, sowie der Analytik. Damit verfolgt es das Ziel einer zukunftsfähigen und nachhaltigen Weinwirtschaft. Durch seine Fachkenntnisse ist es prädestiniert dafür, die agrarwissenschaftlichen Analysen vor Ort durchzuführen.

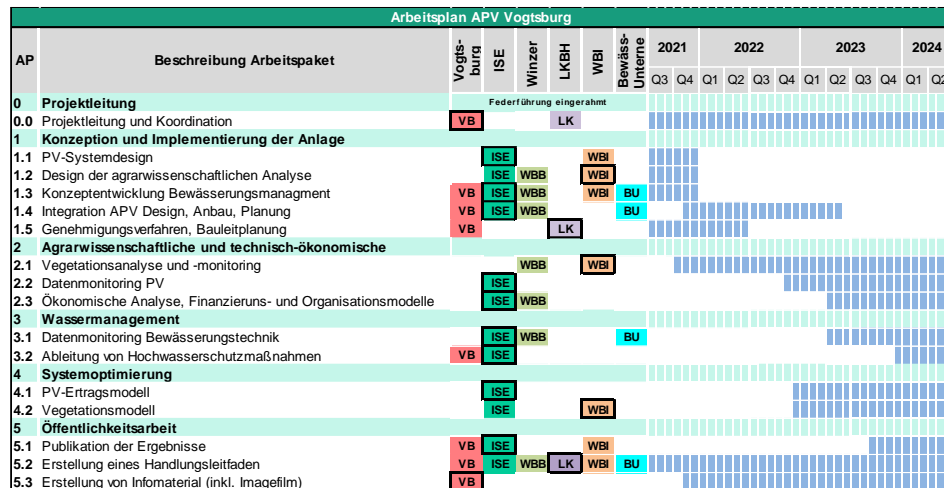
Bewässerungsunternehmen: Ein auf Bewässerung spezialisiertes Unternehmen bringt sein Praxiswissen ein, um ein Bewässerungssystem zu konzipieren und aufzubauen, das mit dem PV-Strom betrieben wird und Regenwasser nutzt, welches über die Modulflächen gesammelt wird. Vielversprechende Vorgespräche mit einem regionalen Unternehmen haben stattgefunden.

Bürgerenergiegenossenschaft Solarpark Vogtsburg eG: Die BEG ist als assoziiertes Partner beratend in das Projektteam integriert. Sie soll helfen, die Akzeptanz vor Ort für das Projekt zu fördern und könnte die Pilotanlage ggf. später betreiben.

Zeit- und Arbeitsplan mit Arbeitspaketen aller beteiligten Partner

Die Stadt Vogtsburg plant die Schaffung neuer Personalressourcen für die Gesamtkoordination des Projektes. Neben der Koordination der Projektpartner steht die Öffentlichkeitsarbeit im Vordergrund, um mit Transparenz und frühzeitiger Information der lokalen Bevölkerung für die Akzeptanz des APV-Projektes zu sorgen: in der Tourismusdestination spielt das Landschaftsbild eine wichtige Rolle. Möglichkeiten zur Vermarktung der APV als neue Attraktion, auch für Fachpublikum, sollen ausgelotet werden. Da die Stadt Vogtsburg über kommunale Rebflächen in nennenswerten Umfang verfügt, ist auch ein Flächenbeitrag denkbar.

Tabelle B 1 Arbeitsteilung und Zeitplan, Skizzenphase



Finanzierungsplan, Darstellung der Eigenbeteiligung der Kommune

Finanzierungsplan:

Tabelle B 2 Vorkalkulation Pilotanlage Vogtsburg.

Vorkalkulation Pilotanlage Vogtsburg		
Systemparameter	Einheit	Wert
Fläche	[m ²]	2.000
Leistung pro Modul	[kWp]	0,32
Gesamtzahl der Module	[No.]	400
Gesamtleistung der Anlage	[kWp]	128
GHI	[kWh / m ²]	1.220
Performance ratio	[%]	0,85
Spezifischer Stromertrag im Jahr 0	[kWh / kWp]	1.037
Investitionskosten (CAPEX)	EUR total	EUR / kWp
Solarmodule (semi-transparent)	55.040	430
Unterkonstruktion	64.000	500
Installation, Arbeitskosten	51.200	400
Wechselrichter (string inverters)	15.360	120
Netzanschluss	83.200	650
Verkabelung	4.608	36
Sonstige Kosten	17.280	135
CAPEX	290.688	2.271
Betriebskosten (OPEX)	EUR / kWp / a	18

Die Stadt Vogtsburg plant die Schaffung neuer Personalressourcen für die Gesamtkoordination des Projektes. Neben der Koordination der Projektpartner steht die Öffentlichkeitsarbeit im Vordergrund, um mit Transparenz und frühzeitiger Information der lokalen Bevölkerung für die Akzeptanz des APV-Projektes zu sorgen: in der Tourismusdestination spielt das Landschaftsbild eine wichtige Rolle. Möglichkeiten zur Vermarktung der APV als neue Attraktion, auch für Fachpublikum, sollen ausgelotet werden. Die Bereitstellung kommunale Rebflächen als Eigenbeitrag der Stadt ist denkbar.

Tabelle B 3 Überschlägige Ertragsrechnung Prototyp.

Überschlägige Ertragsrechnung Prototyp		
Systemparameter	Einheit	Wert
Spezifischer Stromertrag im Jahr 0	[kWh / kWp]	1.037
Pro Jahr Gesamtanlage	[kWh / a]	132.736
Über 20 Jahre	[kWh]	2.654.720
Strompreis	[€/kWh]	0,05
Einnahmen aus Stromverkäufe während Projektlaufzeit	[€]	19.910
Einnahmen aus Stromverkäufe nach Projektende	[€]	112.826
Gesamteinnahmen über 20 Jahre	[€]	132.736

Tabelle B 4 Budgetplanung Skizzenphase.

Vorkalkulation APV									
Projektpartner	Personenmonate	Personalkosten in €	Personalaufwand in €	Kosten Prototyp (netto)	Sonstige Kosten €	Travel Cost in €	Sum	Förderquote	Förderung
Stadt Vogtsburg	18,0	6.000 €	108.000 €	- €	75.000 €	3.500 €	186.500 €	90%	167.850 €
Fraunhofer ISE	21,5	14.460 €	310.890 €	157.952 €	55.000 €	3.500 €	527.342 €	100%	527.342 €
Winzereibetrieb	10,0	6.000 €	60.000 €	- €	- €	2.500 €	62.500 €	60%	37.500 €
Schillinger	10,0	7.000 €	70.000 €	- €	- €	3.000 €	73.000 €	60%	43.800 €
WBI	18,0	7.000 €	126.000 €	- €	- €	3.500 €	129.500 €	100%	129.500 €
Landkreis Br-Hochschw.	18,0	5.550 €	99.900 €	- €	- €	2.500 €	102.400 €	90%	92.160 €
Total	95,5	46.010 €	774.790 €	157.952 €	130.000 €	18.500 €	1.081.242 €	92%	998.152 €

Angestrebte Innovation und Verwertung

Die APV wird erstmals in Deutschland im Weinbau eingesetzt, um als Instrument zur Klimaanpassung die wirtschaftliche Zukunftsfähigkeit von Weinbauregionen zu sichern und das Potenzial von APV als Hochwasserschutzmaßnahme zu untersuchen. Nachgeführte PV-Module ermöglichen eine Anpassung der Lichtverhältnisse, um Wetterextreme auszugleichen und bestmögliche Bedingungen für den Weinbau zu schaffen.

Die bauliche Anlage schützt die Reben in mehrfacher Hinsicht vor schädlichen Witterungseinflüssen. Dabei werden Weinberge flächenschonend doppelt genutzt: zum einen für den Weinbau, zum anderen für die Produktion erneuerbaren Stroms. Dieser wird im Sinne der Kreislaufwirtschaft vor Ort eingesetzt, um Wasserpumpen für die Bewässerung der Rebflächen zu betreiben. Das Wasser zur Bewässerung kommt trinkwasserschonend aus Regenwasserreservoirs. So leistet das Projekt in mehrfacher Hinsicht einen Beitrag zum Ressourcenschutz. Das Pilotprojekt von APV im Weinbau dient gleichzeitig dem Klimaschutz, der Kreislaufwirtschaft und der Minderung der Flächeninanspruchnahme.

Darüber hinaus erschließt die Produktion von regenerativ erzeugtem Strom der Region eine neue Wertschöpfungsmöglichkeit im Weinberg und sichert zudem die traditionelle Wirtschaftsprodukt Wein, das den Grundstock für andere Wirtschaftszweige, insbesondere den Tourismus, bildet. Das Projekt fördert die örtliche Netzwerkbildung zwischen Stadtverwaltung, Winzern, Tourismusbranche, Gewerbe, BEG, Bürgerschaft und Forschung.

Mit dem Projekt werden Lösungswege zu folgenden Fragen aufgezeigt, in öffentlichkeitswirksamen Materialien verarbeitet und zwecks Übertragbarkeit auf andere Weinbauregionen Deutschlands in Arbeitshilfen zusammengefasst:

- Wie wirkt sich die APV auf die Weinpflanzen aus?
- Welche Bewässerungstechnik kann mit einer APV-Anlage baulich kombiniert und mit PV-Strom betrieben werden?
- Mit wie viel APV-Fläche kann wie viel Rebfläche bewässert werden (nach Möglichkeit auch in Abhängigkeit von der Steigung des Geländes)?
- Wie sollte ein APV-Projekt in Weinregionen prozessual aufgesetzt werden?
- Welche genehmigungsrechtlichen Fragen sind zu klären und wie kann die Genehmigung gelingen?
→ *Verwertung im Praxisleitfaden*: Checkliste, Ablauf der relevanten Schritte
- Wie kann APV im Weinbau so eingesetzt werden, dass der Eingriff ins Landschaftsbild möglichst gering bleibt?
→ *Verwertung im Praxisleitfaden*: Empfehlungen für die Standortsuche
- Welche Finanzierungs-, Organisations- oder Geschäftsmodelle sind erfolgversprechend für eine wirtschaftliche Umsetzung vor Ort?
→ *Verwertung im Praxisleitfaden*: Ideensammlung, z.B. Umsetzung mit einer Bürgerenergiegenossenschaft, Sicherungsfonds zur finanziellen Absicherung von Winzern, die Flächen bereitstellen.
- Welche Erfolgsfaktoren sind – insbesondere mit Blick auf den Tourismus – relevant für die Akzeptanz der APV vor Ort?
→ *Verwertung im Praxisleitfaden*: Vorlagen für Presseartikel, Flyer, Präsentationen

Folgende Aktivitäten der Öffentlichkeitsarbeit sollen im Rahmen des Projektes die Übertragbarkeit in andere Regionen Deutschlands fördern: audiovisuelle Präsentation für Website und für die Tourist-Information vor Ort, ggf. Themenweg zur Versuchsfläche, Fachvorträge in anderen Regionen Deutschlands, Öffentlichkeitsarbeit des Weinbauinstituts, Marketing der Gemeinde, wissenschaftliche Publikationen. Das Projekt erprobt damit einen innovativen Ansatz, mit dem die Zukunftsfähigkeit des Weinbaus als Wirtschaftsgrundlage einer Region in Zeiten des Klimawandels gesichert werden soll.

Notwendigkeit der Zuwendung

Der Bau und Betrieb der Forschungsanlage ist nach heutigem Kenntnisstand mit erheblichen Risiken verbunden. Aus wissenschaftlicher Sicht liegt dies vor allem an dem frühen Stadium der APV-Technologie sowie an den bisher gänzlich unbekannt möglichen Nutzeffekten oder Problemen, die sich auf weinbaulicher Seite ergeben. Kein Winzer würde, selbst bei guter finanzieller Förderung und entsprechender

rechtlicher Reform diesen Weg gehen, ohne dass dazu weinbauliche Erfahrungen, Daten und Ergebnisse vorliegen und ein Anschauungsbeispiel vor Ort besichtigt werden kann.

Grundlagenforschung ist für APV im Weinbau in deutschen Gebieten noch nicht vorhanden, daher fehlen entscheidende Daten, Fakten und Hintergrundinformationen für eine mögliche Implementierung. Gerade im Weinbau existieren trotz des augenscheinlichen Potenzials noch so gut wie keine wissenschaftlich fundierten Erkenntnisse oder gar erste praktische Versuche.

Vor allem aufgrund des fehlenden Regelrahmens und der damit verbundenen Unsicherheit ist derzeit noch völlig unklar, ob sich tatsächlich ein nennenswerter Markt für APV im Weinbau entwickeln wird. Das Risiko, dass die Investition in die Entwicklung eines solchen neuen Anlagentyps nur zu einem kleinen Teil durch spätere Einnahmen zurückgezahlt werden kann, ist damit groß. Für die Umsetzung des Forschungsvorhabens ist die Projektgruppe deswegen auf staatliche Förderung angewiesen. Dies gilt auch deshalb, weil eine Förderung auf europäischer Ebene aufgrund des fehlenden Bezugs zu europäischen Themen nicht möglich ist.

Unterschrift Antragsteller:

_____xxx_____

Bürgermeister Bohn
Stadt Vogtsburg

_____xxx_____

Ort, Datum