



Potential der Agri-Photovoltaik in Thüringen

Verfasser*innen:

Kerstin Wydra, Vera Vollmer, Sabine Schmidt, Susann Prichta, Rahel Kunze, Hubert Aulich

Kontakt:

SolarInput e.V.
Gustav-Tauschek-Str. 2
99099 Erfurt
Tel.: 0361 600 85 700
E-Mail: info@solarinput.de
Web: www.solarinput.de

Gefördert durch:

Freistaat
Thüringen



Ministerium
für Umwelt, Energie
und Naturschutz

Verfasser*innen:

Prof. Dr. Kerstin Wydra	Fachhochschule Erfurt, SolarInput e.V.
Vera Vollmer	SolarInput e.V.
Dr. Sabine Schmidt	SolarInput e.V.
Susann Prichta	Fachhochschule Erfurt
Rahel Kunze	Fachhochschule Erfurt
Dr. Hubert Aulich	SolarInput e.V.

Stand: 28.02.2022

Version vom: 18.05.2022

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie untersucht das Potential ackerbaulicher und gartenbaulicher Flächen und Kulturen sowie von Sonderkulturen in Thüringen auf ihre Eignung zur **dualen Nutzung zur Produktion von Nahrungsmitteln und Solarstrom auf derselben Fläche** (Agri-Photovoltaik, APV). Die Stromerzeugung ist in bestehende Strukturen integrierbar, Synergien können genutzt werden. Angesichts der wetterbedingten Ertragsverluste der letzten Jahre und der zukünftig zu erwartenden Schäden ist für nahezu alle Kulturen durch die Schutzwirkung der APV vor Hagel, Starkregen, Frost, Trockenheit, Sturm, Hitze und Sonnenbrand ein Mehrwert in der landwirtschaftlichen Produktion zu erwarten. Die **Gesamtproduktivität** (Ertrag aus Landwirtschaft und Energieproduktion) **der agri-photovoltaisch genutzten Fläche** lässt sich nach wissenschaftlichen Untersuchungen generell um mindestens **60 % – 70 %** und in trockenen Jahren sogar **um 90 % steigern**. Zusätzlich bieten APV-Anlagen **Potential zur Steigerung der Biodiversität** durch den Einsatz von Blühstreifen oder Hecken als Umrandung.

Die Studie gibt einen **Überblick** zum politischen Umfeld der APV, dem Stand der Technik bei APV-Anlagen, zur Naturverträglichkeit und zu Anbauoptionen mit APV, den rechtlichen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sowie Handlungsempfehlungen für den Gesetzgeber. Sie zeigt, dass die **duale Nutzung mit Vorteilen für Kulturpflanzen und Boden im Rahmen der Klimaanpassung verbunden ist, bei gleichzeitiger Produktion von emissionsfreiem Solarstrom**. Voraussetzung dafür sind nutzerfreundliche, rechtliche Rahmenbedingungen sowie attraktive Förderbedingungen. Es sollte ein sichtbarer Mehrwert und Nutzen für Landwirt*innen, Bürger*innen und Kommunen entstehen, wie er bereits von der EU vorgeschlagen wurde, deren Richtlinien dazu im deutschen Recht aber noch angepasst werden müssen.

Weiterhin empfiehlt die Studie eine **beschleunigte Baugenehmigung** durch die Aufnahme der APV-Anlagen in die Liste der „privilegierten Vorhaben“, sowie durch den Gesetzgeber die Förderung für APV-Anlagen für die duale Erzeugung von Nahrungsmitteln **und** Solarstrom zu genehmigen. APV ist als eine „der Landwirtschaft dienende Funktion“ einzustufen, die die Landwirt*innen auch nach Notwendigkeit für die Kulturpflanzen einsetzen können, und die wie andere, übliche Kulturschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft behandelt werden sollten.

Ein Schwerpunkt der Studie sind **Anbauoptionen für Kulturpflanzen unter APV-Anlagen**, um Potentiale für APV-Anlagen in Kombination mit in Thüringen angebauten oder zu empfehlenden Kulturpflanzen aufzuzeigen. Schattenverträgliche Pflanzen werden ebenso empfohlen wie Kulturen, die unter den genannten Stressbedingungen von einem Schutz durch APV profitieren. Zudem wird aufgezeigt, dass durch die positiven Effekte der APV-Anlagen Verbesserungen in Mikroklima, Bodenzustand, Wassermanagement und Biodiversität erwartet werden. Mit einer entscheidenden, zukünftigen Steigerung des Einsatzes der APV-Anlagen sind

deutliche Kostensenkungen durch das Nutzen von Skaleneffekten zu erwarten. Optionen für ressourcensparende und zukünftig kostengünstigere APV-Anlagen werden aufgezeigt.

Im **Gesamtergebnis** zeigt unsere Studie, dass durch die duale Nutzung der Ackerflächen für Nahrungsmittel und Solarstrom ein wesentlicher Beitrag gegen die Erwärmung unseres Planeten und zur Sicherung der Nahrungsmittelversorgung geleistet werden kann. Für Thüringen ergibt sich für **Ackerflächen und Dauerkulturen abzüglich der 0,2 % dieser Flächen in Naturschutzgebieten (605.153 ha) ein Potential mit leicht und hoch aufgeständerten Agri-Photovoltaik Anlagen von 424 GWp Leistung. Hinzu käme ein Potential von rund 67 GWp mit vertikalen Anlagen für das Grünland** (s. Kapitel 5.7). Wieviel von diesem hohen Potential in der Praxis umgesetzt wird, hängt von positiven, politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen ab. Die Studie empfiehlt, die Förderung und den Aufbau von klein- und großflächigen APV-Anlagen in Thüringen, um die Realisierung des aufgezeigten hohen Potentials von Agri-Photovoltaik umzusetzen und damit auch zu einer Verbesserung der Einkommen von Landwirt*innen und Kommunen beizutragen.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	IV
Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	VIII
1 Einleitung	1
2 Politisches Umfeld und Status Quo	2
2.1 Politik.....	2
2.2 Status Quo Energie.....	3
2.2.1 Emissionen.....	4
2.2.2 Flächenverbrauch	5
2.2.3 Thüringen	5
2.3 Status Quo Landwirtschaft	6
2.3.1 Klimawandel in Deutschland	7
2.3.2 Biodiversität in Deutschland.....	8
2.3.3 Klimawandel in Thüringen.....	9
2.3.4 Biodiversität in Thüringen	14
2.3.5 Ernteverluste in Thüringen	14
2.4 Agri-Photovoltaik.....	15
3 Stand der Technik	20
3.1 Aufständigung.....	21
3.1.1 Hochaufgeständerte Anlagen / Kategorie I	21
3.1.2 Bodennahe Anlagen / Kategorie II.....	24
3.1.3 Tracking-Systeme	26
3.1.4 Innovationen	28
3.2 Module	35
3.2.1 Semitransparente Module.....	35
3.2.2 Bifaziale Module	36
3.2.3 Leichtmodule	37
3.2.4 Dünnschicht-Module	37
3.2.5 Organische Module	38
3.2.6 Farbige Module	39
3.2.7 Konzentrierende PV.....	39
3.2.8 Tube Solar	40
3.2.9 Anti-Reflexbeschichtung.....	41
3.3 Fundamentierung.....	41
3.4 Regenwasserauffangsystem.....	42
3.5 Eingliederung und Standortwahl.....	43
3.5.1 Anordnung	43
3.5.2 Eignungsflächen.....	44
3.5.3 Landschaftsbild.....	44
3.6 Netzeinspeisung, Eigenverbrauch und Stromerlöse	46
3.7 Fazit	48
4 Naturverträglichkeit, Mikroklima, Ressourcen	51
4.1 Ackerfläche und Schutzgüter.....	52
4.2 Boden, Wasser, Erosion, Biodiversität	53
4.3 Schutzkonstruktionen	55

4.4	Ackerfläche und APV	55
4.5	Wirkung PV-FFA auf Schutzgüter – Übertragungsmöglichkeit auf APV	57
4.6	Boden	59
4.7	Wasserhaushalt	60
4.8	Temperatur/Wärme	60
4.9	Biodiversität	61
4.10	Terrestrische Wirbellose	62
4.11	Reptilien, Amphibien, Vögel	63
4.12	Säugetiere	64
4.13	Mögliche negative Einflüsse auf Umwelt, und Verminderungs- und Vermeidungsmaßnahmen	65
4.13.1	Landschaft	65
4.13.2	Reflexionen	66
4.13.3	Kontaminationen	67
4.13.4	Boden	68
4.14	APV	69
4.14.1	Boden, Wasser und Erosion	70
4.14.2	Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit	72
4.14.3	Biodiversität	73
4.15	Fazit	75
5	Anbau unter APV-Anlagen	77
5.1	Thüringen als Agrarstandort	78
5.2	Ertragsverluste in Landwirtschaft und Gartenbau durch Klimawandel	86
5.3	Schattentoleranz oder der limitierende Faktor Licht	90
5.3.1	Schattierungsversuche	90
5.3.2	Physiologie	92
5.3.3	Morphologie	95
5.3.4	Ertragsbildung und Assimilateverteilung	96
5.4	Anbau und Kulturführung der Pflanzen mit Bezug zu APV-Anlagen	98
5.4.1	Anbaumanagement landwirtschaftlicher Kulturen	99
5.4.2	Agrartechnik und Zusatzbewässerung in der Landwirtschaft	101
5.4.3	Anbaumanagement gemüsebaulicher Kulturen	103
5.4.4	Agrartechnik und Zusatzbewässerung im Gartenbau	104
5.4.5	Anbaumanagement von obstbaulichen Kulturen	105
5.4.6	Agrartechnik und Zusatzbewässerung	106
5.5	Eignung der landwirtschaftlichen Kulturen in Thüringen mit Fokus auf ihre Schattentoleranz	107
5.5.1	Monokotyle Arten – Getreide	107
5.5.2	Monokotyle Arten – Futtergras	108
5.5.3	Monokotyle Arten – Mais	109
5.5.4	Dikotyle Arten – weitere Futter-, Energie- und Rohstoffpflanzen in Thüringen	109
5.5.5	Dikotyle Arten – Hackfrüchte	110
5.5.6	Dikotyle Arten – Hülsenfrüchte	110
5.5.7	Dikotyle Arten – Ölf Früchte	111
5.6	Eignung der gartenbaulichen Kulturen in Thüringen mit Fokus auf ihre Schattentoleranz	114
5.6.1	Kohlgemüse	114
5.6.2	Monokotyle Blatt- und Stängelgemüse	115
5.6.3	Dikotyle Blattgemüse	115
5.6.4	Perennierende Blatt- und Stängelgemüse	116
5.6.5	Wurzel- und Knollengemüse	116
5.6.6	Fruchtgemüse	117
5.6.7	Obstkulturen	117
5.6.8	Weitere Sonderkulturen	120
5.7	Fazit	123

6	Rechtliche Rahmenbedingungen.....	127
7	Bestehende Projekte.....	130
7.1	Forschungsprojekt Heggelbach	133
7.2	Private Praxisanlage in Büren.....	134
7.3	Forschungsanlage Weihenstephan	135
7.4	Privatanlage der Firma Next2Sun in Dirmingen	136
7.5	Forschungsanlage APV-Obstbau in Gelsdorf	137
7.6	Forschungsanlage der Krinner GmbH.....	138
7.7	Zusammenfassung Bestehende Projekte	139
8	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung.....	141
8.1	Berechnungsgrundlage.....	141
8.2	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand eines Beispiels.....	144
8.3	Ökonomie leicht-aufgeständerter APV-Anlagen	149
8.4	Fazit	152
9	Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger	154
10	Anhang	156
	Literaturverzeichnis	164

Abkürzungsverzeichnis

APV	Agri-Photovoltaik
BFI	Blattflächenindex
CAPEX	Investitionskosten, engl. "Capital expenditures"
FNP	Flächennutzungsplan
GCR	Flächenbelegungsrate (engl. ground cover ratio)
LCOE	Levelized Cost of Electricity
LEP	Landesentwicklungsplan
LER	Flächennutzungseffizienz (engl. land equivalent ratio)
OPEX	Operational Expenditure
OPV	Organische Photovoltaik
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung (engl. photosynthetically active radiation)
PPA	Power Purchase Agreements
PV	Photovoltaik
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlage
ROI	Return on Investment

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technisches Potential der Photovoltaik in Deutschland in verschiedenen Sektoren.....	4
Abbildung 2: Installierte Photovoltaik-Leistung in Thüringen.....	5
Abbildung 3: Flächenaufteilung in Deutschland.	6
Abbildung 4: Selbstversorgungsgrad mit Nahrungsmitteln in Deutschland.	7
Abbildung 5: Schadenaufwand in der Landwirtschaft durch Wetterextreme in Deutschland .	8
Abbildung 6: Falschfarbenbild einer mehrjährigen Beobachtung der Vegetation Thüringens aus dem Weltall	9
Abbildung 7: Trockengefährdete ackerbauliche Gebiete in Thüringen	10
Abbildung 8: Gebiete trockengefährdeter Bodenarten in Thüringen.....	11
Abbildung 9: Übersicht über Dürreregionen in Deutschland.....	11
Abbildung 10: Gebiete mit <550 mm Niederschlag im langjährigen Mittel.....	12
Abbildung 11: Wassererosionsgrundgefährdung der Ackerfläche in Thüringen	13
Abbildung 12: Humusgehalte in Thüringer Böden	13
Abbildung 13: Ernteschwankungen und -verluste im Obst, Getreide und Raps, Änderungen 2021 in Prozent gegenüber dem Mittel (2015/2020) (TMIL, 2021b).....	15
Abbildung 14: Flächennutzungspotential eines Hektars Ackerland.....	16
Abbildung 15: Flächeneffizienz von vier Anbaukulturen gemessen über zwei aufeinanderfolgende Jahre unter variierenden Wetterbedingungen	17
Abbildung 16: Skizze der Seitenansicht einer APV-Anlage.....	20
Abbildung 17: Darstellung APV-Anlage Kategorie I nach DIN SPEC 91434	22
Abbildung 18: Darstellung APV mit Sonderkultur Himbeeren, welche Aufständigung als Rankhilfen verwenden	23
Abbildung 19: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 1 nach DIN SPEC 91434.....	25
Abbildung 20: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 2 nach DIN SPEC 91434.....	26
Abbildung 21: Simulation der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) der Pflanzen in den Varianten Tracking, Anti-Tracking und feststehend (oben), sowie die Leistungsverläufe der Module der drei Varianten (unten)	27
Abbildung 22: Mögliche Schutzwirkungen der Kulturen durch verschiedene Ausrichtungswinkel bei (Anti-)Tracking-Systemen	28
Abbildung 23: Modell einer Seilkonstruktion für eine APV-Anlage in Sachsen	29
Abbildung 24: Pilotanlage mit abgespannter Seilaufhängung in Straßkirchen, Bayern.....	30
Abbildung 25: Beispiel einer Faltdachanlage mit Solarmodulen, kommerziell bereits über Parkplätzen und Infrastrukturanlagen.	31
Abbildung 26: PV-Anlage mit Holzaufständigung.....	32
Abbildung 27: Darstellung Dome-Struktur Ost-West-Ausrichtung der Freiflächenanlage in Hölzengraben, Kaiserlautern.....	33
Abbildung 28: Dome-Strukturen über Spargelkulturen auf Rad-Schienen-Konstruktion	34
Abbildung 29: Solarbogen "Modular Arc System" der Firma GoldbeckSolar mit Tierhaltung	35

Abbildung 30: Semitransparente Module, hier als Überdachung für Himbeeren, Niederlande (BayWa r.e., 2021).	36
Abbildung 31: Wechselseitige Anordnung bei bifazialen Modulen in vertikaler Ausrichtung (Next2Sun GmbH, 2021).	37
Abbildung 32: Flexibles Dünnschicht-Modul der Firma Flisom (Flisom AG, 2021).	38
Abbildung 33: Verschiedene Anwendungsmöglichkeiten von OPV bspw. an Gewächshäusern (Vandest & Hemetsberger, 2021).	39
Abbildung 34: Konzentrierende PV-Module der Firma Insolight über Himbeerkulturen in Conthey, Schweiz (Agroscope, 2021).	40
Abbildung 35: Veranschaulichung des Aufbaus und der Konstruktionsweise der Modultechnologie der Firma TubeSolar AG (TubeSolar AG, o.J.).	41
Abbildung 36: Direkte Verankerung im Boden von APV-Anlagen mithilfe von Spinnankern (Spinnanker GmbH, 2021).	42
Abbildung 37: Variation eines Bewässerungssystems von APV-Anlagen.....	43
Abbildung 38: Vergleich Anordnung „Block“ (links) und Anordnung „Zebra“ (rechts).....	44
Abbildung 39: Integrativer Gestaltungsansatz von APV-Anlagen	45
Abbildung 40: Schematische Darstellung verschiedener PV-Muster.....	46
Abbildung 41: Vergleich Einspeisung, Erzeugung und Eigenverbrauch der Hofgemeinschaft der Forschungsanlage Heggelbach	47
Abbildung 42: Nutzungsmöglichkeit des Stroms einer APV-Anlage.....	48
Abbildung 43: Einteilung des Gesamtgebiets in 3 Gefährdungsklassen hinsichtlich der Schadverdichtungsgefährdung des Bodens in Thüringen.....	54
Abbildung 44: „Benachteiligte Gebiete“ in Thüringen © GDI-Th (TMIL, 2022).	56
Abbildung 45: Beispiel für die standortangepasste Gestaltung einer PV-FFA.	66
Abbildung 46: Bodenschutzplatten zur Verwendung gegen Bodenverdichtungen	69
Abbildung 47: Veränderung der Bodenfeuchte an verschiedenen Messpunkten unter der APV-Anlage und unter freiem Himmel in Abhängigkeit von der Bodentiefe.....	71
Abbildung 48: Mehrfachnutzungskonzept auf landwirtschaftlichen Flächen.....	74
Abbildung 49: Honigbienen auf Eagle Point Solar Farm, Oregon (NCSL, 2020).	74
Abbildung 50: Photovoltaik, Artenschutz und Landwirtschaft auf einer Fläche.	75
Abbildung 51: Agrargebiete Thüringens (Graf, 2018).	78
Abbildung 52: Phänologische Uhr Deutschland (DWD, 2021).	81
Abbildung 53: Landwirtschaftliche Nutzfläche und deren Anteile differenziert nach Ackerbau und Grünland auf das Bundesland Thüringen und seine Landkreise übertragen (Schreiber, 2021).....	82
Abbildung 54: Anbaufläche der in Thüringen angebauten Getreidearten (TLS, 2021).	83
Abbildung 55: Körnerfrüchte und ihre jeweiligen Anbauflächen in ha im Jahr 2020 in Thüringen, logarithmiert zur besseren Skalierung (TLS, 2021).	83
Abbildung 56: Kulturarten aus dem Bereich Futter- und Energiepflanzen und ihre jeweiligen Anbauflächen in Thüringen 2020 (TLS, 2021).	84
Abbildung 57: Wurzel- und Knollenfruchtarten nach Anbaufläche in ha in Thüringen 2020 (TLS, 2021).	84

Abbildung 58: Anbaufläche der zehn häufigsten Gemüsearten in Thüringen 2018 – 2020 (Käferle, 2021).	86
Abbildung 59: Ertragsverlauf der letzten 12 Jahre bei ausgewählten Obstarten	89
Abbildung 60: Ertragsunterschiede der Kulturen unter APV gegenüber den Referenzflächen im Jahr 2017 (blau) und im Jahr 2018 (rot) in Heggelbach	92
Abbildung 61: Die Abhängigkeit der Photosynthese von der Beleuchtungsstärke in einer C3-Pflanze (Taiz & Zeiger, 2000).....	93
Abbildung 62: Durch Photoinhibition induzierte Änderungen der Lichteffektkurven der Photosynthese (Taiz & Zeiger, 2000).	94
Abbildung 63: Kriterien für die Schattentoleranz von gartenbaulichen und landwirtschaftlichen Kulturen (eigene Darstellung).	98
Abbildung 64: Typische Entwicklung der Bodenbedeckung durch verschiedene Ackerfrüchte in Mitteleuropa	99
Abbildung 65: Erträge von Wintergerste bei einem Schattierungsversuch des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums Augustenberg (Seidl, 2014).....	107
Abbildung 66: Erträge bei Grünland bei unterschiedlichen Schattierungsstufen bei einem Versuch des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums Augustenberg	108
Abbildung 67: Einteilung der in Thüringen angebauten oder für Anbau empfohlenen Kulturen in schattentolerante Pflanzen und Arten, die unter Stressbedingungen im Schutz von APV-Anlagen gute Erträge bringen (eigene Darstellung).....	125
Abbildung 68: Beispielhafter Ablauf eines Bebauungsplanverfahrens).....	128
Abbildung 69: Darstellung der Entwicklung der APV von 2010 bis 2020	131
Abbildung 70: APV-Forschungsanlage an der Universität Montpellier, Frankreich.....	132
Abbildung 71: Visualisierung der APV-Anlage in Heggelbach	133
Abbildung 72: Himbeerkulturen unter der APV-Anlage Büren, die Aufständigung wird als Rankhilfe genutzt.	134
Abbildung 73: Bewirtschaftung der APV-Anlage in Freising an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (Beck, o.J.).....	135
Abbildung 74: Blick auf die APV-Anlagen Dirmingen aus Vogelperspektive	136
Abbildung 75: Bewirtschaftung der APV-Anlage in Dirmingen (Next2Sun GmbH, 2021).	137
Abbildung 76: Semitransparente Glas-Glas-Module der APV-Anlage im Apfelanbau in Gelsdorf (Hopf, 2021).	137
Abbildung 77: Forschungsanlage HyPERFarm - Seilauflistung der Firma Krinner Carport GmbH.	138
Abbildung 78: Darstellung Amortisationszeit Berechnungsbeispiel (eigene Darstellung)....	150
Abbildung 79: Ökonomischer Vergleich der Stromgestehungskosten verschiedener APV-Systeme und PV-FFA auf einem Hektar in Cent pro kWh	152

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht potentieller technischer APV-Möglichkeiten	49
Tabelle 2: Klimatische Parameter in Thüringen bezogen auf die entsprechenden Agrarräume und exemplarischen Landkreise	79
Tabelle 3: Darstellung der angebauten Sonderkulturen in Thüringen 2020 in Bezug auf die Anbauflächen.....	85
Tabelle 4: Transpirationskoeffizienten ausgewählter Kulturpflanzen.....	87
Tabelle 5: Ertragsverluste der wichtigsten Obstarten in Thüringen gegenüber dem mehrjährigen Durchschnitt (TMIL, 2021a).....	89
Tabelle 6: Landwirtschaftliche Kulturen und entsprechende Aussaat-/Pflanzmonate	100
Tabelle 7: Landmaschinen und entsprechende Arbeitsbreiten	103
Tabelle 8: Gemüsearten und ihre Anbauzeiten. Grün entspricht der Aussaatzeit, blau der Pflanzzeit	104
Tabelle 9: Eignung landwirtschaftlicher Kulturen für Anbau in APV-Anlagen auf Basis von Literatur und Rückschlüssen aus physiologischen Eigenschaften	113
Tabelle 10: Eignung gartenbaulicher Kulturen für Anbau in APV-Anlagen auf Basis von Literatur und Rückschlüssen aus physiologischen Eigenschaften	122
Tabelle 11: Forschungs- und Praxisanlagen in Deutschland mit verschiedenen Systemtechniken	140
Tabelle 12: Kostenaufstellung verschiedener APV-Systeme.	147
Tabelle 13: Parameter der beispielhaften APV-Anlage auf einem Hektar Fläche und Weiterführung in Tabelle 14.....	150
Tabelle 14: Berechnungsgrundlage der beispielhaften APV-Anlage auf einem Hektar mit Bezug auf Tabelle 12.....	151
Tabelle 15: Kostenvergleich verschiedener APV-Systeme bezogen auf die Fläche [ha]	153

1 Einleitung

Diese Studie entstand mit Förderung durch das Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz und beschreibt detailliert, welches hohe Potential die genutzten Ackerflächen in Thüringen bieten, um bei weiterhin hohen Erträgen der Nahrungsmittel einen hohen Beitrag an grünem Strom zu liefern. Die Idee der Doppelnutzung von Ackerflächen für Nahrungsmittel und gleichzeitig Solarstrom (Agri-Photovoltaik, APV) ist nicht neu, sie wurde erstmals vor mehr als 30 Jahren von Professor Adolf Götzberger, dem Leiter des Fraunhofer Instituts für Solare Energie in Freiburg, beschrieben (Trommsdorff et al., 2020). Damals wurde der Bedarf an zusätzlichen Flächen aus der Landwirtschaft als gering eingeschätzt, standen doch genügend ungenutzte Flächen auf den Dächern und in der Fassade großer Gebäude zur solaren Stromnutzung zur Verfügung. Mit den globalen Klimazielen, bis 2045 nicht mehr als 1,5°C Erwärmung des Planeten zuzulassen und die dazu erforderlichen CO₂-Emissionen bis 2045 auf null zu senken, hat sich diese Situation deutlich verändert. Insbesondere für Deutschland, das zum Erreichen der Klimaziele auf die Photovoltaik gesetzt hat, ist die Suche nach geeigneten Flächen für die Installation der Module von hoher Bedeutung. Zwar hat die Photovoltaik in den letzten Jahren den weltweiten Durchbruch zur kostengünstigsten Stromerzeugung geschafft, zum Erreichen der deutschen Klimaziele bis 2030 – von derzeit ca. 50 GWp auf 200 GWp – sind deutlich höhere Anstrengungen zu erbringen als in der Vergangenheit.

Die Studie geht davon aus, dass die in Thüringen bewirtschaftete Ackerfläche abzüglich der Flächen der Naturschutzgebiete (0,2 % der für APV zur Verfügung stehenden Ackerflächen und Sonderkulturen) auch für die APV genutzt werden können. In Kapitel 5 ‚Anbau unter APV‘ wird beschrieben, wo sich positive oder negative Einflüsse durch die APV ergeben und wie diese Einflüsse zu bewerten sind.

Unsere Ergebnisse zeigen, dass mit einer verstärkten Nutzung der APV nicht nur die Zielerreichung im Strombereich erhöht wird, sondern es können sich deutliche Einkommensverbesserungen der Landwirte, Schutz der Ernten vor den Folgen der Klimaveränderung wie Hagel, Stürme, Starkregen, Dürreperioden, Hitze sowie Verbesserungen der Bodenqualität und Erhöhung der Biodiversität ergeben. Die Studie betrachtet diese einzelnen Aspekte in den entsprechenden Kapiteln.

Damit diese positiven Auswirkungen auf den Strombereich, die Landwirte, die Ernteerträge, den Schutz der Natur und die Artenvielfalt wirksam werden können, sollte der APV ein Sonderstatus eingeräumt werden und vorhandene Hindernisse sollten aus dem Wege geräumt werden. Im rechtlichen Teil der Studie werden diese Aspekte betrachtet und festgestellt, dass die notwendigen Bedingungen in Deutschland und Thüringen noch nicht existieren. Handlungsempfehlungen werden formuliert.

Weiterhin sind verstärkte Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zu leisten, und der Aufbau von zusätzlichen Pilotanlagen mit neuen technologischen Entwicklungen sollte erleichtert werden, damit die auf internationaler Ebene bereits gemachten Erfahrungen auch im eigenen Land geprüft und verbessert werden können.

2 Politisches Umfeld und Status Quo

Die Studie zu Potentialen der Agri-Photovoltaik in Thüringen untersucht Chancen und Hemmnisse der APV und schlägt Lösungen unter vornehmlicher Berücksichtigung der Systemintegration von Landwirtschaft, Energiewirtschaft und Naturschutz vor. Ein wesentliches Ziel der Studie ist es, wissenschaftlich basierte Entscheidungshilfen anzubieten und Empfehlungen zur Implementierung von APV in Thüringen als Beitrag zur dringend notwendigen Energiewende unter Berücksichtigung auch einer ‚Agrarwende‘ zu erarbeiten.

2.1 Politik

Mit dem im Juni 2021 verabschiedeten Klimaschutzgesetz steuert Deutschland Klimaneutralität bis zum Jahr 2045 an. In weniger als neun Jahren sollen 80 % unseres Stroms aus erneuerbaren Energien erzeugt werden. Deshalb haben sich die Ressorts Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Umwelt (BMUV) und Landwirtschaft (BMEL) darüber verständigt, wie bestehende Flächenpotentiale besser für den Ausbau der Solarenergie genutzt werden können. Laut Bundesminister für Wirtschaft und Klimaschutz Robert Habeck soll die **Photovoltaikleistung in Deutschland bis zum Jahr 2030 von derzeit knapp 60 GW auf rund 200 GW** ausgebaut werden, was einer Verdreifachung des Status Quo entspricht. Dafür wird ein **Photovoltaik-(PV)-Zubaupfad** angestrebt: 2022: ca. 7 GW, 2023: ca. 9 GW, 2024: ca. 13 GW, 2025: ca. 15,5 GW, 2026: ca. 17,5 GW, 2027: ca. 19 GW, 2028-2030: 20 GW/Jahr. (BMW, 2022)

Um die Klimaziele zu erreichen, gehen Szenarien von einem notwendigen Ausbau der PV auf bis zu 500 GWp aus (Brandes, et al., 2021). Dies entspricht ungefähr einer Verzehnfachung der momentanen PV-Kapazität. Brandes, et al. (2021) konstatieren: *„Die Transformation des deutschen Energiesystems zur Erreichung von Treibhausgasneutralität im Jahr 2045 ist aus technischer und systemischer Sicht machbar. Sie erfordert jedoch auf allen Ebenen Schnelligkeit und ab sofort fast ausschließlich Investitionen in zielkompatible Technologien.“*

Auch die Umweltorganisationen Deutsche Umwelthilfe (DUH), Germanwatch, Greenpeace, WWF und der Umweltdachverband Deutscher Naturschutzring (DNR) fordern einen massiven Ausbau der Solarenergie von mindestens 10 GW jährlich, um bis spätestens 2035 100 Prozent Ökostrom in Deutschland möglich zu machen (Schünemann et al., 2021).

2.2 Status Quo Energie

Im Jahr 2021 basierte die **Bruttostromerzeugung in Deutschland** auf folgenden Energieträgern (in Terawattstunden, TWh): 238 TWh Erneuerbare Energien (EE) (42 %), 108 TWh Braunkohle, 89 TWh Erdgas, 69 TWh Kernenergie, 54 TWh Steinkohle, 5 TWh Mineralölprodukte, 19 TWh Übrige (BDEW, et al., 2021). Der Anteil der EE am Primärenergieverbrauch machte nur 16,1 % aus, während 42 % des Bruttostromverbrauchs durch Erneuerbare Energien abgedeckt werden können, wobei die PV mit einer Stromerzeugung von 51 TWh, 9,1 % abdeckte (Wirth, 2022). Dabei kann PV-Strom an sonnigen Tagen zeitweise bereits über zwei Drittel unseres momentanen Stromverbrauchs liefern. Ende 2021 waren in Deutschland über 2 Mio. Anlagen mit PV-Modulen mit einer Nennleistung von 59 GW installiert (Wirth, 2022). Neue MW-Kraftwerke produzieren PV-Strom zu Kosten von 3 – 5,5 ct/kWh, bei kleinen Dachanlagen liegt die Spanne im Bereich von 6 ct/kWh bis 11,5 ct/kWh.

Allein seit dem Jahr 2010 sind die **Preise für PV-Module** um 90 % gesunken, und ein weiteres Absinken der Kosten auf 2,41 €ct/kWh bis 2030 für Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) in Deutschland wird erwartet. International wurde PV-Strom an Standorten mit hoher Solarstrahlung bereits zu Tiefstpreisen bis zu 1,12 €ct/kWh (Portugal) und 0,87 €ct/kWh (Saudi-Arabien) angeboten. Nach Kost et al. (2018) ist die Stromerzeugung durch PV bereits seit vier Jahren die kostengünstigste Stromerzeugung auch in Deutschland.

Nach Berechnungen des Fraunhofer Instituts für Solare Energiesysteme (ISE) und anderer Organisationen besteht zwar ein technisches Potential des Ausbaus von PV in verschiedenen Sektoren, so auf Dächern, Parkplätzen, Brach- und Konversionsflächen und im Verkehrssektor (Abbildung 1) (Wirth, 2022), doch nur die Ausnutzung aller und insbesondere der größten Potentiale kann auch in der gebotenen Kürze der Zeit den notwendigen Ausbau bis 2030 und darüber hinaus gewährleisten.

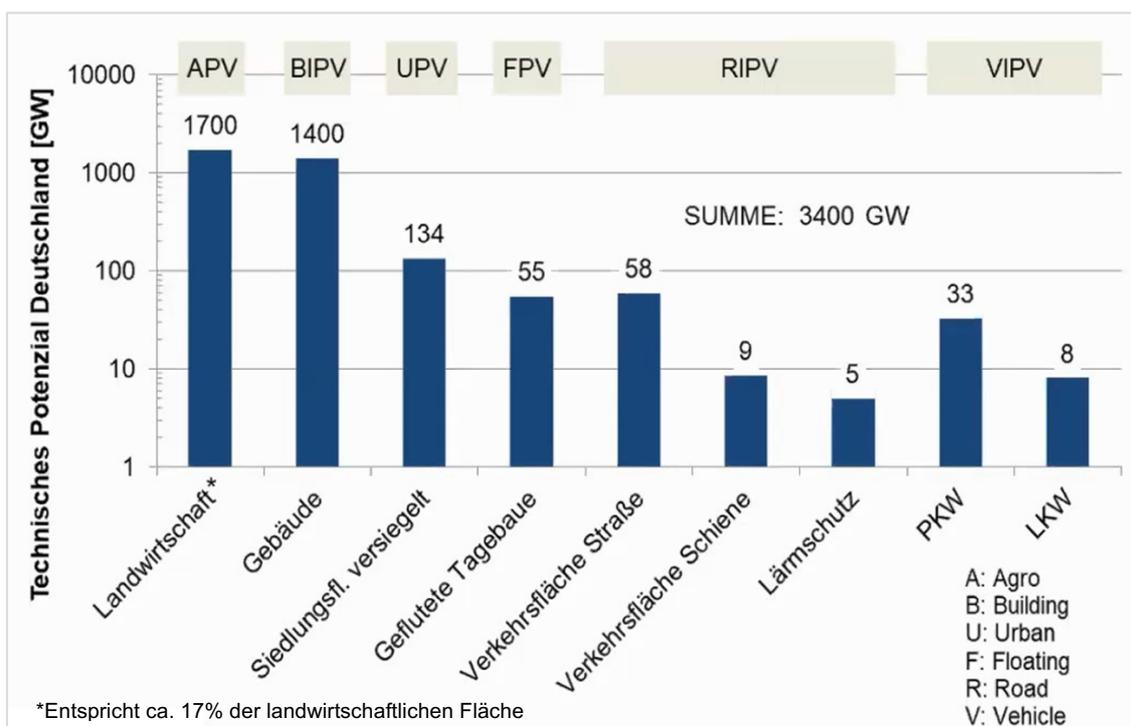


Abbildung 1: Technisches Potential der Photovoltaik in Deutschland in verschiedenen Sektoren (Wirth, 2022).

Das **technische Potential** berücksichtigt im Gegensatz zum theoretischen Potential technische Randbedingungen. In die technische Überschlagsrechnung fließen landwirtschaftliche Flächen wie Dauerkulturen (z.B. Obst- und Weinbau) komplett und Ackerbauflächen (ohne Maisanbau) bei einer Belegungsdichte von 0,6 MWp/ha ein (Wirth, 2022). Welcher Teil des technischen Potentials von 1,7 TWp wirtschaftlich und praktisch nutzbar ist, hängt unter anderem von ökonomischen (inkl. Infrastruktur), regulativen (inkl. Naturschutz) und soziologischen (inkl. Akzeptanz) Rahmenbedingungen ab. Zusätzlich bieten bodennahe, beispielweise auch vertikal aufgeständerte Module (s. Kapitel 3.1.2), mit einem weiten Reihenabstand im Futterpflanzenanbau auf Dauergrünland bei einer Belegungsdichte von 0,25 MWp/ha ein weiteres, technisches Potential von 1,2 TWp. **Weltweit** wird **APV** bereits im GW-Maßstab genutzt, mit einer installierten APV-Leistung von ca. 14 GWp, davon in China über 12 GWp (Stand Juli 2021) mit der weltweit größten APV-Anlage von 700 MWp am Rand der Wüste Gobi über Beeren, während es in Deutschland erst wenige Systeme gibt (Wirth, 2022).

2.2.1 Emissionen

Im Jahr 2021 wurden 4,5 Prozent mehr **Kohlenstoffäquivalente (CO_{2e})** ausgestoßen als 2020 (Agora Energiewende, 2022). Das Ziel von 38 Prozent Emissionsminderungen gegenüber 1990 wurde wieder verfehlt. Auch verantwortlich für den erhöhten CO_{2e}-Ausstoß sei der Rückgang der Stromerzeugung aus Erneuerbaren Energien. Der Anteil von Kohle an der Stromerzeugung stieg 2021 um knapp ein Fünftel auf 27,8 %. Die CO_{2e} Emissionen aus der Stromerzeugung entsprachen damit 13,2 % der gesamten Treibhausgase (THG) und sind

gegenüber dem Vorjahr um 4,2 % angestiegen. Dies entspricht Emissionen aus der Energiewirtschaft von 247 Mio. t CO_{2e}. Werden die EU-Minderungsziele in den Sektoren Energie, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft im Jahr 2030 verfehlt, folgen auch europarechtliche Konsequenzen, die zu erheblichen Belastungen des Bundeshaushalts führen.

2.2.2 Flächenverbrauch und Flächennutzung

Neben den Emissionen ist der Energiewirtschaft auch ein hoher Flächenverbrauch zuzuschreiben. Der Braunkohletagebau hat in Deutschland eine Fläche von 177.300 ha (UBA, 2022) zerstört, mehr als die dreifache Fläche des Bodensees, und Energiepflanzen belegen ein Fünftel des deutschen Ackerlandes (FNR, 2019). Auf 2,45 Millionen Hektar wuchsen 2018 in Deutschland Pflanzen, die nicht für die Ernährung, sondern die Energiegewinnung oder industrielle Nutzung angebaut wurden. Derzeit werden zudem täglich 56 ha allein für Siedlungs- und Verkehrsflächen verbraucht. Bis zum Jahr 2030 soll die Neuinanspruchnahme von Flächen für Siedlungen und Verkehr auf 30 ha pro Tag, und bis 2050 auf eine Netto-Null reduziert werden. Der Erhalt von landwirtschaftlicher Fläche für die Nahrungsmittelproduktion steht hier im Vordergrund. Schon die Reduktion des Anbaus von Energiepflanzen würde daher in großem Maße Flächen für Nahrungsmittelproduktion, effektive Gewinnung von Erneuerbaren Energien und Biodiversitätsmaßnahmen freisetzen, wie in dieser Studie ausgeführt wird.

2.2.3 Thüringen

Thüringen weist im Jahr 2021 (Stand Oktober) eine **installierte PV-Leistung kumuliert** von **1,9 GW** auf. Ein Leistungszubau ist unter Berücksichtigung des erhöhten Strombedarfs für E-Mobilität, grünen Wasserstoff und strombasierte Wärmeversorgung um das 3-4-fache auf mindestens 6,8 GW bis 2030 und um das 8-fache bis 2040 notwendig.

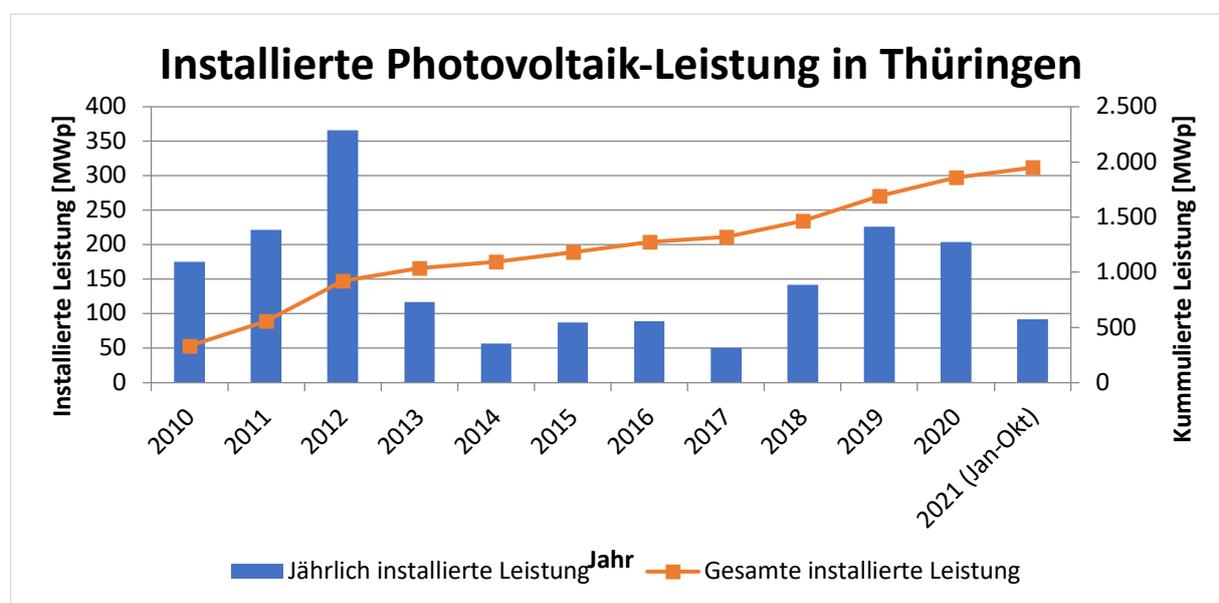


Abbildung 2: Installierte Photovoltaik-Leistung in Thüringen (Bundesnetzagentur, 2022).

2.3 Status Quo Landwirtschaft

Die **Landwirtschaft spielt in der Klimakrise eine doppelte Rolle**: einerseits leiden landwirtschaftliche Erträge und Böden unter dem Klimawandel, und die Bewirtschaftung bedarf einer dringenden Anpassung, um die Produktion in den nächsten Jahren und Jahrzehnten zu erhalten und zu stabilisieren, andererseits trägt sie maßgeblich zur Emission klimaschädlicher Gase bei. Dem Landwirtschaftssektor wurden im Jahr 2021 rund 66 Millionen Tonnen CO_{2e} zugeschrieben, was knapp 9 % der Gesamtemissionen entspricht. Mit der geplanten Anhebung des Anteils ökologischen Landbaus an der landwirtschaftlichen Fläche bis 2030 auf 30 Prozent und durch regenerative, Humusaufbau fördernde Landwirtschaft kann sie einen Beitrag zum Klimaschutz leisten, und durch Diversifizierung kann die Klimaanpassung unterstützt werden. Fast die Hälfte der Fläche Deutschlands wird landwirtschaftlich genutzt. Die landwirtschaftlich genutzte Fläche in Deutschland beträgt knapp 17 Millionen Hektar (Abbildung 3).

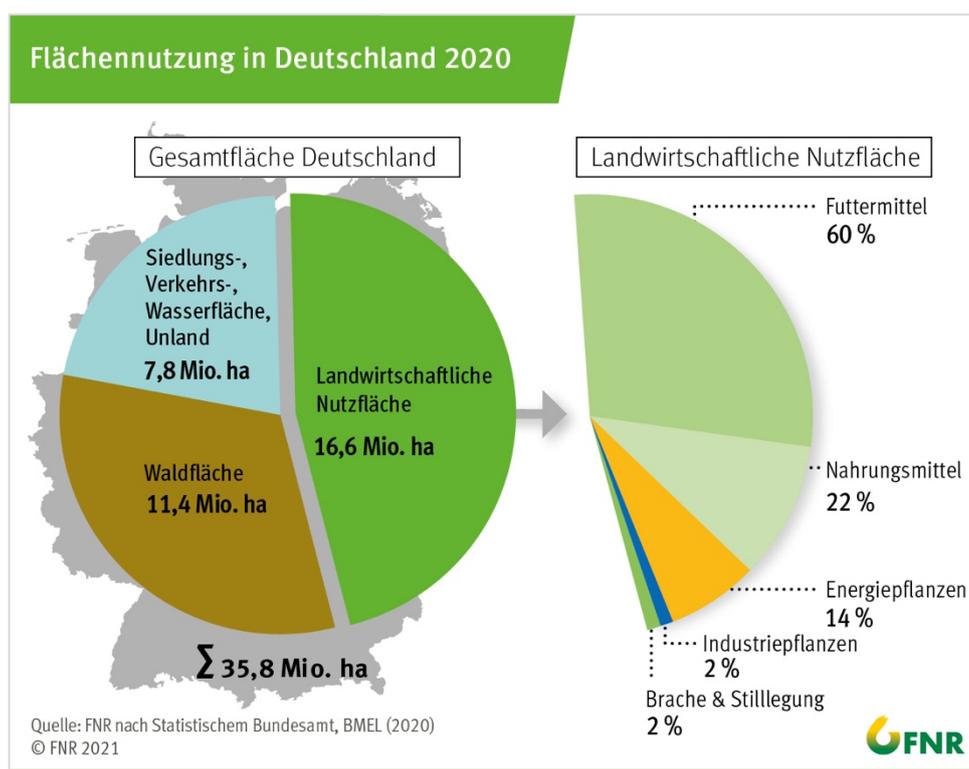


Abbildung 3: Flächenaufteilung in Deutschland (FNR, 2020).

Auf die Produktion von Bioenergie (2016: 2,4 Mio. ha) entfallen auf **Biogas 1,4 Mio. ha, Bioethanol 0,26 Mio. ha und Biodiesel 0,72 Mio. ha** (FNR, 2020). Im Jahr 2016 wurden zudem 60 % der Agrarfläche für den Futteranbau verwendet. Dies entspricht ca. 10 Mio. ha Fläche, davon jeweils ca. 50 % Wiesen/Weiden (Grünland), von denen auch ein Anteil für Biogasproduktion geerntet wird, und 50 % klassisches Ackerland (DVT, 2020), während Nahrungsmittelproduktion 22 % und Brache und Stilllegung 2 % ausmachten. Insgesamt entfallen auf Dauergrünland, darunter Wiesen und Weiden, 8,5 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche. Obst und Gemüse wächst auf 1 % der Fläche, was für das Jahr 2019 einen Selbstversorgungsgrad

für Gemüse von 37 %, und für Obst (ohne Zitrus) von 19 % ergibt (BLE, 2018) (Abbildung 4). Damit ist der **Selbstversorgungsgrad in Deutschland mit Gemüse und Obst sehr niedrig. Mit nur rund 1,3 % der landwirtschaftlichen Fläche trägt der Gartenbau über 10 % zur Wertschöpfung in der Landwirtschaft bei** (Rösch et al., 2019). Die Situation in Thüringen wird in Kapitel 2.3.5 beschrieben.

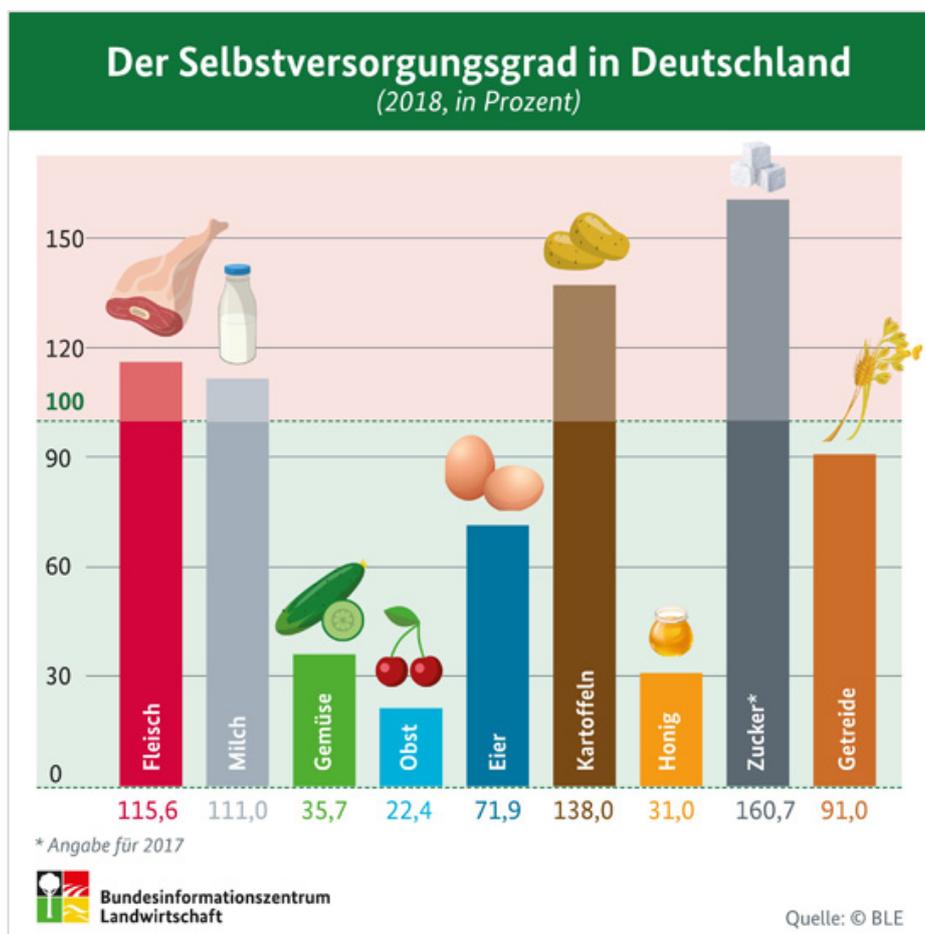


Abbildung 4: Selbstversorgungsgrad mit Nahrungsmitteln in Deutschland (Jahr 2018) (BLE, 2018).

2.3.1 Klimawandel in Deutschland

Häufigkeit und Stärke von **Wetterereignissen** nehmen zu, was die Gefahr von Ernteverlusten bis hin zum Totalausfall stetig steigert, stabile Ernten werden immer unsicherer (UBA, 2021). Trockenheit stellt zunehmend ein Problem dar: mit steigenden Temperaturen und dadurch erhöhter Evapotranspiration, einer früher beginnenden und verlängerten Vegetationsperiode mit dadurch gesteigertem Wasserbedarf der Kulturpflanzen und der vorhergesagten Verschiebung der Niederschlagsverteilung hin zu höheren Niederschlägen im Winterhalbjahr, ist zukünftig in den Frühjahrs- und Sommermonaten vermehrt ein Wasserdefizit zu erwarten. In den letzten 12 Jahren wurden in Deutschland bereits im April Niederschlagsmengen teilweise bis zu 70 % unter dem langjährigen Mittel beobachtet, was in Kombination mit der wärmebedingten, stärkeren Verdunstung zu einem nicht mehr aufholbaren Schaden an jungen Pflanzen

und einem Wasserdefizit im Boden führt (Ionita et al., 2020). Extremwetterereignisse wie Hagel-bringende Hitzegewitter im Frühjahr und Sommer nehmen an Anzahl zu, Spätfröste stellen zusätzlich ein hohes Risiko zu Beginn der Vegetationsperiode dar, und häufigere Stürme und Starkregen, die alle Kulturpflanzen schädigen, führen zu weiteren Ernteverlusten. Aufgrund der zunehmenden Extremwetterereignisse (Essl & Rabitsch, 2013), wie Gewitter mit Starkregen und Hagel oder Spätfröste haben sich ertragsmindernde Wetter-Einflüsse auf Obstkulturen und im Weinbau verstärkt (Abbildung 5). Aufgeplatzte Kirschen, durch Hagel beschädigte Äpfel oder erfrorene Blüten und Fruchtansätze bedeuten erhebliche Ernteverluste und betriebswirtschaftliche Schäden (Dierend, 2009). ‚Business as usual‘ wird somit zu stetig steigenden Einbußen in Quantität und Qualität der Ernten fast aller Kulturen führen.

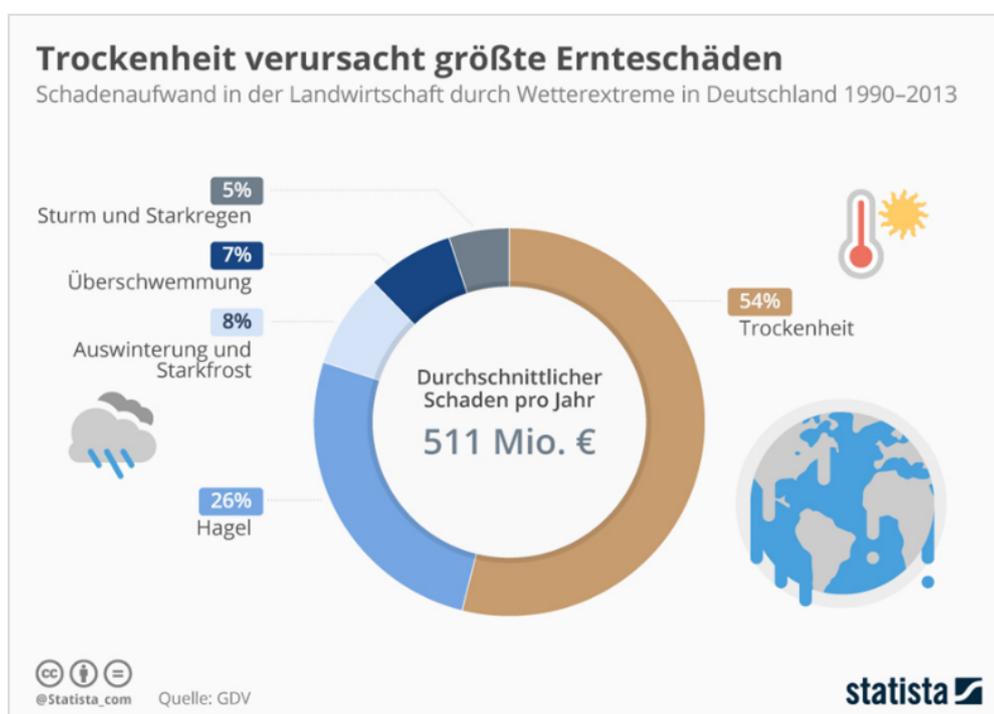


Abbildung 5: Schadenaufwand in der Landwirtschaft durch Wetterextreme in Deutschland 1990-2013 (Nier, 2018).

2.3.2 Biodiversität in Deutschland

Die hochintensive Landwirtschaft wird als einer der Hauptverursacher für den Insekten-schwund und den damit zusammenhängenden Vogelartenschwund zitiert – im Zeitraum von 1980-2016 haben sich die Vogelbestände in der Agrarlandschaft um 34 % verringert (BFN, 2019). Zwischen 1989 und 2013 verzeichneten die Insektenforscher*innen bei Untersuchungen in Naturschutzgebieten bei Fluginsekten einen Biomasse-Rückgang von rund 80 %, 40 % aller Insektenarten sind bedroht oder bereits ausgestorben (Hallmann, et al., 2017). Weltweit sind intensiv genutztes Ackerland und Klimaerwärmung assoziiert mit fast 50% Reduktionen im Insektenvorkommen (Outhwaite et al., 2022). Durch immer größere Schläge mit Reinkulturen und ohne Ackerwildkräuter, eingeschränkte Fruchtfolgen und das Verschwinden von

Strukturelementen wie Hecken, Feldrainen und blütenreichen Böschungen kommt es zu einer Verschlechterung und zum Verlust des Lebensraums vieler Wildtiere.

2.3.3 Klimawandel in Thüringen

Die Nutzung der Landesfläche in Thüringen ist in der Abbildung 6 einer mehrjährigen Beobachtung aus dem Weltall dargestellt. Ein unterschiedliches Pflanzenwachstum zeigt sich in verschiedenen Farben und die landwirtschaftliche Fläche ist klar erkennbar.

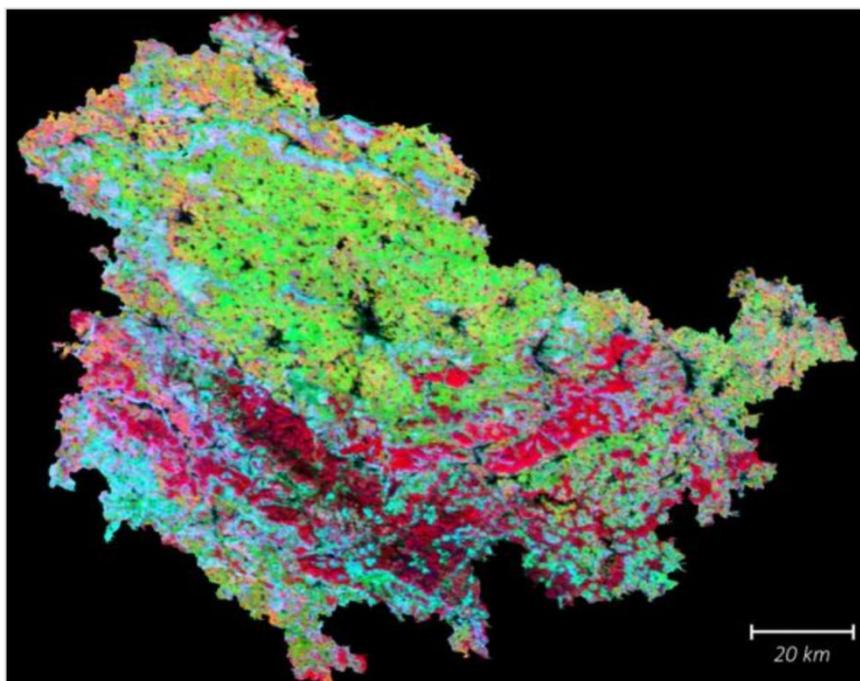


Abbildung 6: Falschfarbenbild einer mehrjährigen Beobachtung der Vegetation Thüringens aus dem Weltall. Rottöne – ganzjähriges Wachstum (Nadelbäume), Blautöne – kein Wachstum im Winter (Laubholz), Grüntöne – schnelles und schwankendes Pflanzenwachstum (landwirtschaftliche Flächen), Schwarz – Städte (geringes, bis kein Pflanzenwachstum) (FSU Jena, 2016).

In Thüringen trifft der Klimawandel auf trockengefährdete, ackerbauliche Gebiete mit trocken-sensiblen Bodenarten wie schluffigen Lehm (Muschelkalkplatten (Kalktone) & Keuperhügelland (Keupertone)) (TLU, 2008) (Abbildung 7). Laut Thüringer Bauernverband (TBV, 2021) fehlte es an 150-200 Litern Wasser im Boden pro Quadratmeter infolge der Dürrejahre 2018 und 2019 (Abbildung 8) TBV: „Der Klimawandel ist für viele Landwirt*innen in Thüringen bereits heute Realität und auch zukünftig muss sich die Landwirtschaft auf Trockenperioden und andere extreme Witterungsereignisse (z.B. Starkregen) einstellen und muss mit dem finanziellen Risiko der Ernteaufschläge umgehen.“ Getreide und Sonderkulturen wie Hopfen und Kirschen zeigten starke Ertragsverluste (pers. Mitt. Agrargenossenschaften Weißensee, Bösleben, Obsthof Triebe). Gartenbaulich betroffene Gebiete befinden sich in den Regionen Hildburghausen (Baumschulstandort), Jena (Weinbaustandort), Pößneck (Standort für Heil-, Duft,-

u. Gewürzpflanzenproduktion), Mühlhausen (Baumschul-, Gemüse-, Zierpflanzenproduktion), Kindelbrück (Obst) und Sömmerda (Baumschul- & Zierpflanzenproduktion).

In Thüringen finden sich im **Thüringer Becken und insbesondere in den ackerbaulichen Lagen im nördlichen und mittleren, südlichen Thüringen stark trockengefährdete Gebiete, mit Bodenart ‚schluffiger Lehm‘** (Abbildung 7, Abbildung 8).

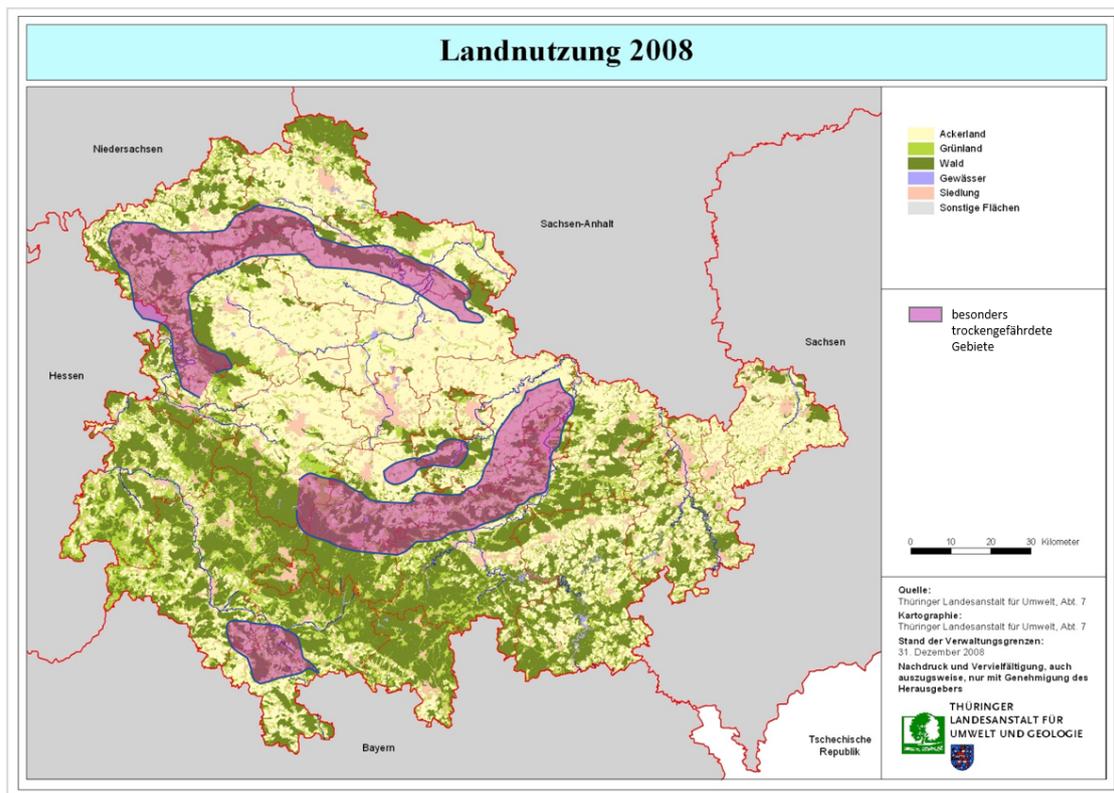


Abbildung 7: Trockengefährdete ackerbauliche Gebiete in Thüringen (ergänzt nach Thüringer Landesanstalt für Umwelt, Abt. 7, 2008).

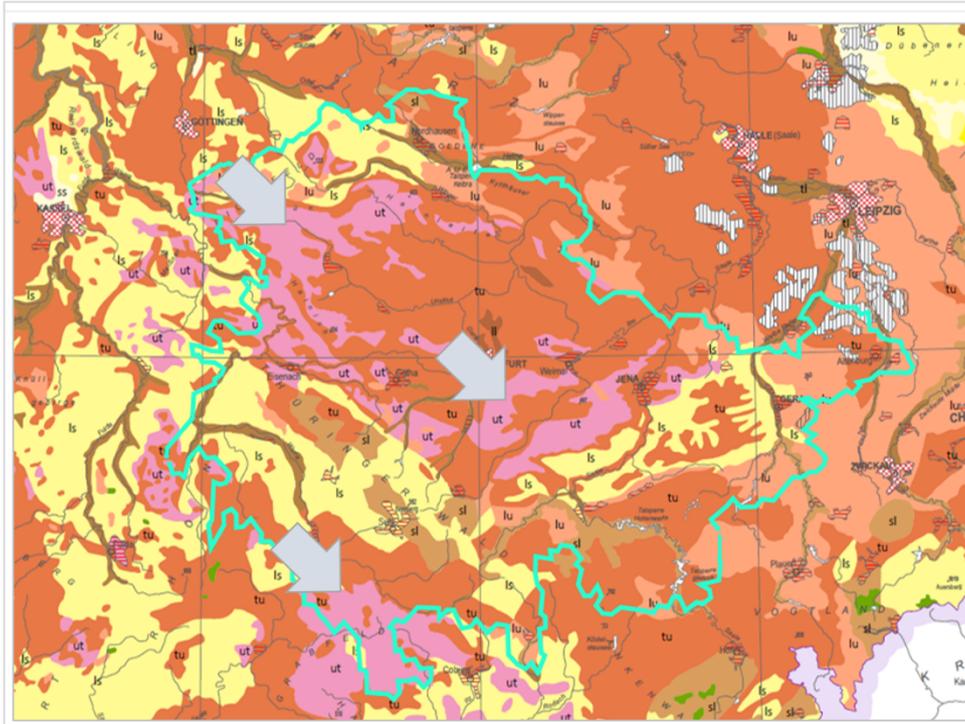


Abbildung 8: Gebiete trockengefährdeter Bodenarten in Thüringen (ergänzt nach Stegger & Vinnemann, 2007) Legende: ut: schluffiger Lehm.

Eine außergewöhnliche Dürre setzte sich in den Jahren 2018 und 2019 bis in große Bodentiefen fort und verursachte auch im Folgejahr noch Ernteverluste. Auch nach dem feuchten Jahr 2021 und den Niederschlägen seit Beginn 2022 haben sich die Bodenvorräte noch nicht komplett wieder aufgefüllt (Abbildung 9).

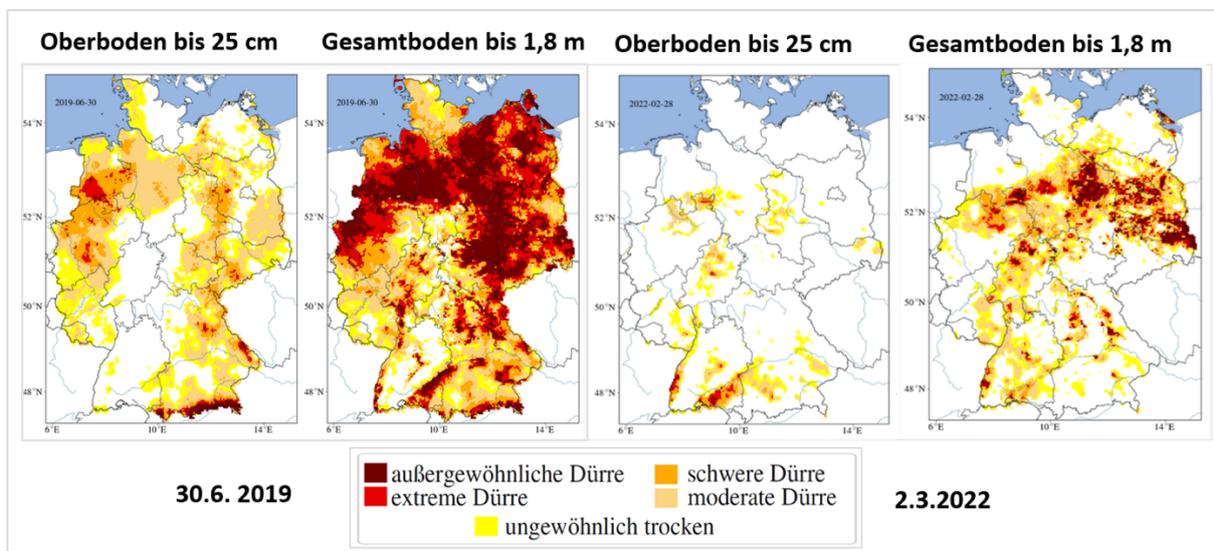


Abbildung 9: Übersicht über Dürreregionen in Deutschland am 30.06.2019 und am 2.3.2022 © UFZ-Dürremonitor/ Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung (Marx, 2019).

Starkregenfälle treffen in Thüringen somit auf erosionsgefährdete Gebiete mit zunehmend trockenen Böden, in denen folglich mit einem hohen ‚run-off‘ und Bodenabtrag zu rechnen ist. Schon im Jahr 2013 konstatierte das Thüringer Ministerium für Infrastruktur und

Landwirtschaft, dass die Zunahme erosiver Niederschläge mittel- und langfristig Handlungsnotwendigkeit hinsichtlich Erosionsschutz für ackerbaulich genutzte Flächen in Südwestthüringen und in Teilen Nordthüringens- und Ostthüringens bedingt (TMLFUN, 2013). Ostthüringen zählt zu den Gebieten mit den niedrigsten Niederschlägen im langjährigen Mittel (Abbildung 10). Erosionsgefährdet sind ackerbauliche Gebiete auf Grundlage kumulierter Faktoren (Regenfaktor, Körnungsfaktor, Hanglänge, Hangneigung), wo mit einem Bodenabtrag von $>25\text{t/ha}$, teils $>50\text{t/ha}$ und Jahr zu rechnen ist (Abbildung 11).

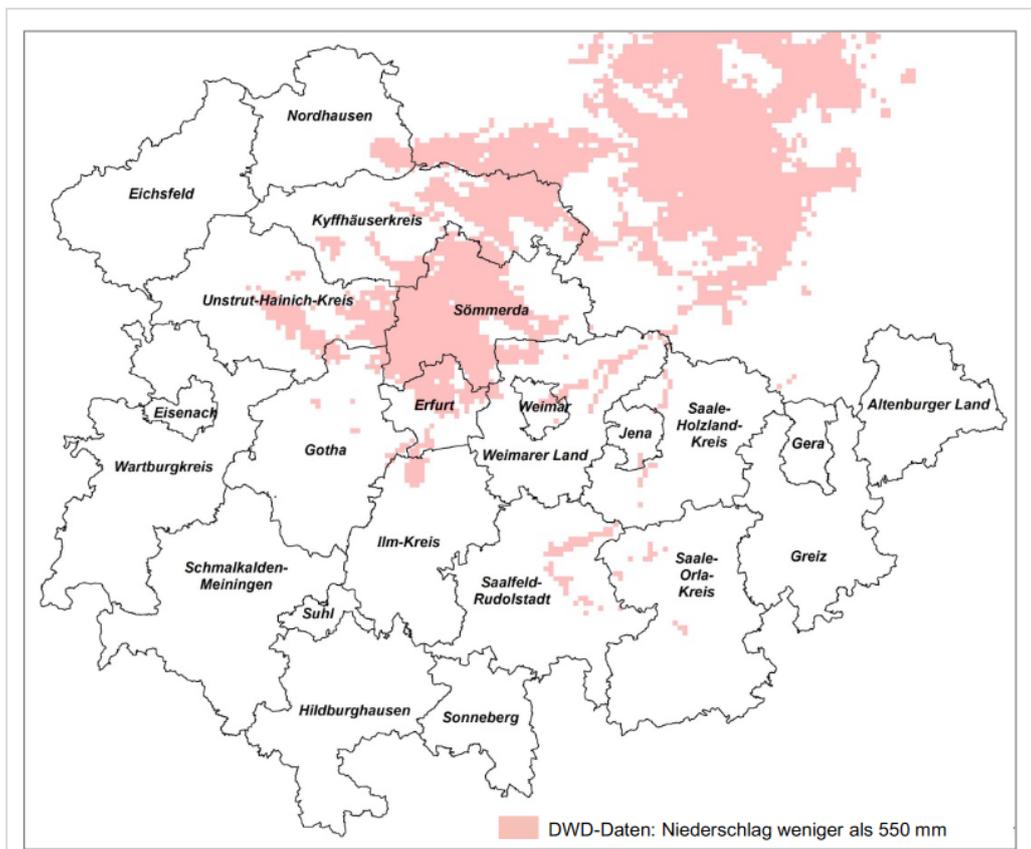


Abbildung 10: Gebiete mit <550 mm Niederschlag im langjährigen Mittel (1991-2019) (Zorn, 2020).

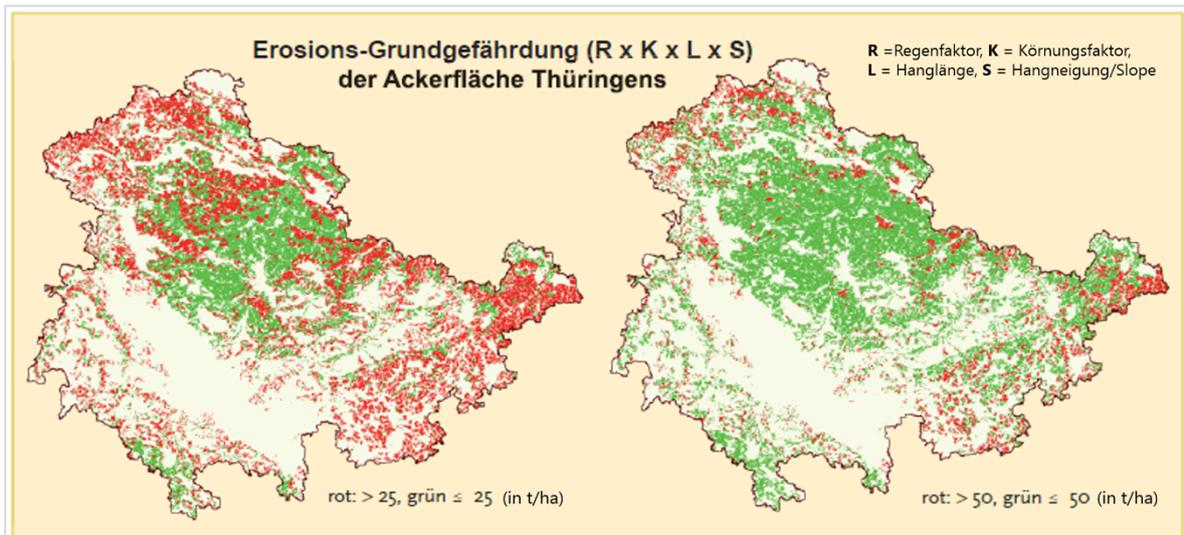


Abbildung 11: Wassererosionsgrundgefährdung der Ackerfläche in Thüringen (leicht ergänzt nach Gullich et al., 2008).

Die klimatischen Bedingungen und Extremereignisse gefährden auch die Bodenfruchtbarkeit und den Humushaushalt. Trockenheit verhindert ein aktives Bodenleben, und eine erhöhte Bodentemperatur führt bei ausreichender Feuchtigkeit zu verstärktem Abbau organischer Substanz. Diese Faktoren treffen auf besonders durch Humusabbau gefährdete Gebiete wie die Humusreservoirs der heimischen Löss-Schwarzerden (Abbildung 12). Die **Humusgehalte** in den Ackerbaugebieten des Thüringer Beckens sind bereits als niedrig einzustufen.

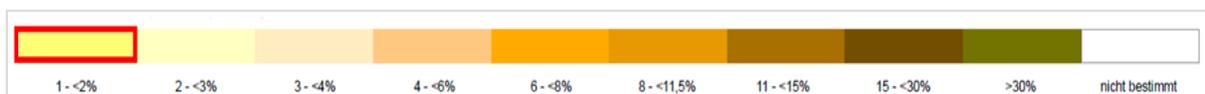
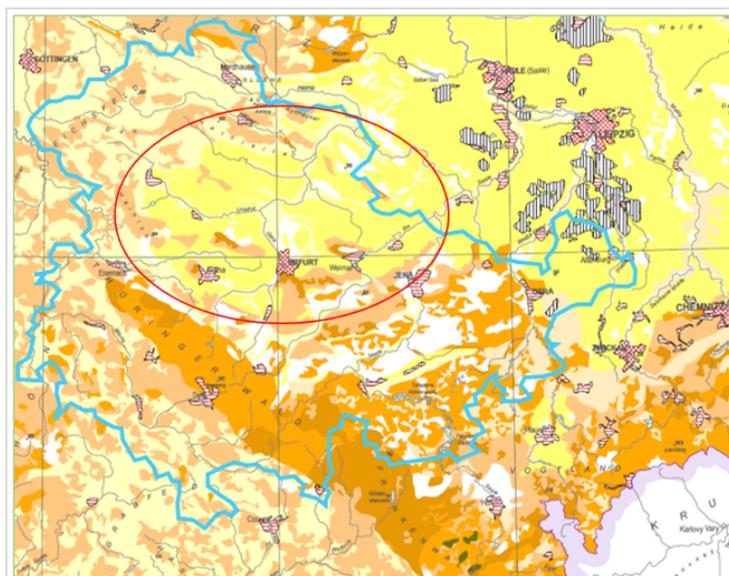


Abbildung 12: Humusgehalte in Thüringer Böden (leicht ergänzt nach Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, 2019).

Auch wenn die Winderosion eine geringe Gefährdung für Thüringer Lössböden aufgrund vorwiegend bindiger Bodenarten darstellt, können starke Winde und Stürme zu massiven

Ernteverluste in allen Kulturen führen, so auch im Getreide, dass ‚ins Lager gehen‘ kann, wodurch hohe Ernteauffälle verursacht werden können. Zudem verursacht Wind eine höhere Verdunstungsrate und steigert die Trockenheitsprobleme.

2.3.4 Biodiversität in Thüringen

Der ländliche Raum ist in weiten Teilen geprägt von ausgeräumten Landschaften, großen Schlägen mit Reinkulturen, wenig Strukturelementen, und stellt in diesen Regionen aus Naturschutzsicht kein schützenswertes Landschaftsbild dar (s.a. Kap. 4, 4,4). Neben einem Verlust an bestäubenden Insekten führt die Artenarmut auch zu Schäden in der Landwirtschaft beispielsweise durch Feldmäuse, oder verringerte Bestäubungsleistung. Vor allem im mittleren Thüringer Becken bieten laut BUND und NABU intensiv bewirtschaftete Ackerflächen mit nur wenig Hecken, Feldgehölzen und Feldrainen kaum geeignete Lebensräume für die natürlichen Feinde der Feldmäuse wie Greifvögel, Fuchs und Mauswiesel (NABU, 2020). Auch der Thüringer Bauernverband setzt sich dafür ein, dass Naturschutz berücksichtigt wird, beispielsweise durch Blühflächen und Aufstellen von Insektenhotels, und dass eine artenreiche Kulturlandschaft gepflegt wird. In der Arbeitsgemeinschaft Bäuerliche Landwirtschaft (AbL) gehören das Biodiversitätskonzept, regenerative Landwirtschaft und insbesondere der Bodenschutz zur Grundlage der Wirtschaftsweise.

Aus den hier aufgeführten Gründen zur Situation des Naturschutzes auf Ackerflächen und aufgrund des Privilegierungsstatus für landwirtschaftliche Flächen in Schutzgebieten sind für APV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen Kategorien der naturschutzfachlichen Bewertung und zahlreiche Restriktionsfaktoren und Wirkfaktoren für Schutzgüter nicht anwendbar (s.a. Kapitel 4).

2.3.5 Ertragsverluste in Thüringen

Die im Jahr 2021 in Thüringen aufgetretenen Ertragsverluste – im Vergleich zu einem Mittel der Jahre 2015-2020, mit den Trockenjahren 2018, 2019 – sind laut Erntebericht 2021 des Thüringer Ministeriums für Infrastruktur und Landwirtschaft zumeist auf wetterbedingte Schäden zurückzuführen (TMIL, 2021b). Dies betrifft sowohl den Obstanbau als auch Getreidearten und Ölfrüchte (Raps) (Abbildung 13).

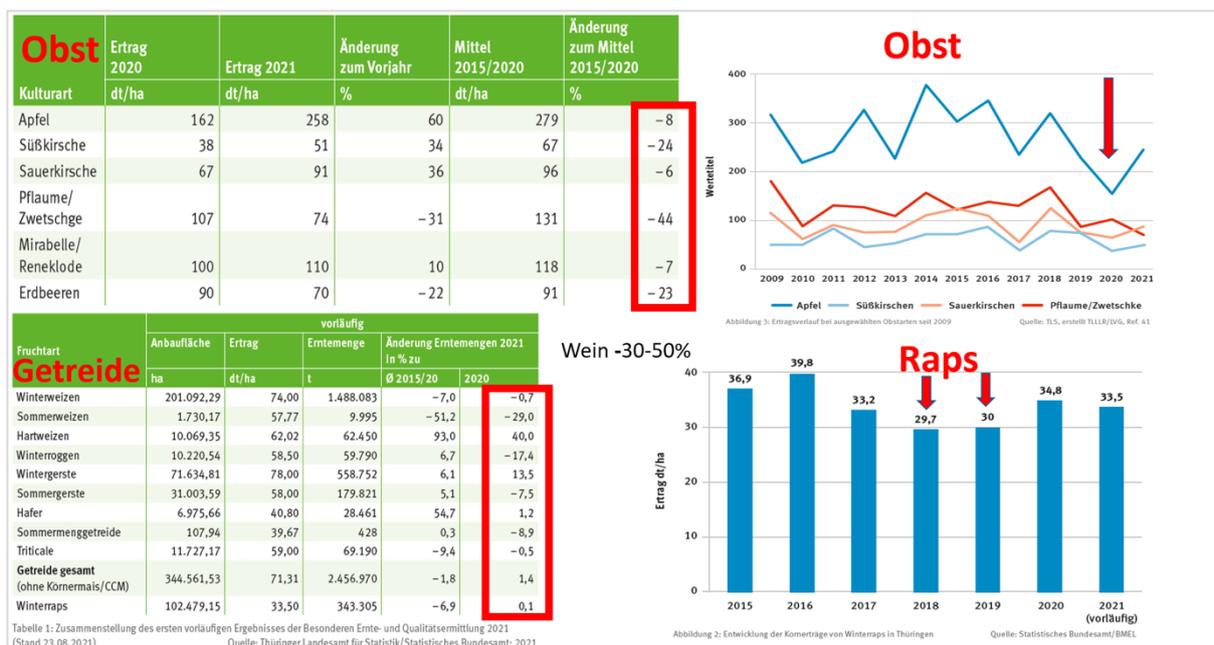


Abbildung 13: Ernteschwankungen und -verluste im Obst, Getreide und Raps; Änderungen 2021 in Prozent gegenüber dem Mittel (2015/2020) (verändert nach TMIL, 2021b).

Bereits im Jahr 2014 wird von der Landesregierung konstatiert: „Der Klimawandel wird mit großer Wahrscheinlichkeit zu einem weiteren Anstieg von Extremwetterlagen führen. Die Landwirtschaft muss sich diesem Wandel stellen. Die Verantwortung darf aber nicht allein auf die Anbaubetriebe abgeschoben werden, denn deren Wirtschaftlichkeit durch geeignete Anpassungsmaßnahmen zu sichern, heißt auch die sozioökonomische Entwicklung im ländlichen Raum zu fördern. Darüber hinaus darf die regionale Nahrungsmittelversorgung nicht gefährdet werden. Die Aufgabe der Politik muss daher sein, die Implementierung geeigneter Anpassungsmaßnahmen wie Hagelschutznetze für Kernobst, Regenschutzüberdachung für Süßkirschen oder Bewässerungssysteme finanziell zu unterstützen. Der benachbarte Freistaat Sachsen zeigt, dass dies möglich ist.“ (A. Siegesmund, Fraktionsvorsitzende von BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN im Thüringer Landtag, derzeit Ministerin für Umwelt, Energie und Naturschutz, Thüringen) (Bündnis 90 / Die Grünen, 2014).

Auch der TBV (2021) fordert Maßnahmen zur Anpassung an den Klimawandel: „Ein geeignetes Risikomanagement, aber auch ackerbauliche Strategien zur hydrologischen Anpassung an den Klimawandel werden über die Zukunft der Landwirtschaft in Thüringen mitentscheiden.“

2.4 Agri-Photovoltaik

Unter Agri-Photovoltaik wird die Symbiose von Landwirtschaft und erneuerbarer Energiewirtschaft durch die ressourceneffiziente Doppelnutzung der gleichen Fläche zur Nahrungsmittel- (Primärnutzung) und Energieproduktion (Sekundärnutzung) verstanden. PV-Anlagen verschiedenen Designs (Aufständerung, Modultechnologie, s. Kapitel 3) werden auf Acker- und Grünlandflächen bzw. Standorten mit Sonderkulturen sowie

gartenbaulichen Kulturen so installiert, dass Pflanzen und Boden ein möglichst großer Schutz vor Extremwetterbedingungen wie Hagel, Stürmen, Starkregen, Trockenheit, Hitze, starker UV-Strahlung und Spätfrösten sowie Sonnenbrand geboten wird (Dupraz et al., 2011, Barron-Gafford, et al., 2019), und parallel eine Solarstromerzeugung für Eigenbedarf und Netzeinspeisung erfolgt. **Die Hauptnutzung des APV-Systems sollte in der landwirtschaftlichen Produktion liegen**, was im Juni 2021 in einer DIN SPEC 91434:2021-05 (derzeit noch Vornorm) definiert wurde (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021). Mit APV-Anlagen kann neben der Schutzfunktion auch eine Steuerung der Qualität und des Erntezeitpunktes von Produkten möglich sein (Reifeverzögerung, Zuckereinlagerung, Minderung von Pflanzenkrankheiten, etc.; s. Kapitel 5).

Durch verschiedene Kombinationen von Anlagentechnik und Anbaukultur ist eine Optimierung der Anlage nach dem Licht- und Schutzbedarf der Kulturpflanze je nach Entwicklungsphase, oder eine möglichst hohe Energieproduktion, beispielsweise außerhalb der Vegetationszeit, möglich. Die Aufständering und das Anlagendesign können so gestaltet werden, dass die Bearbeitung mit landwirtschaftlichem Gerät weiterhin möglich bleibt (s. Kapitel 5.4). Neben den Vorteilen für die Pflanzenproduktion können die Anlagen zum (Regen-)Wassermanagement und zur Erosionsminderung beitragen, sowie die Bodenwasserverdunstung reduzieren. Durch mikroklimatische Effekte kann sich dies auch positiv auf den Wirkungsgrad der Module auswirken (Barron-Gafford, et al., 2019). So wird nicht nur die Flächeneffizienz (LER¹) gesteigert (Abbildung 14), sondern fruchtbarer Boden erhalten. Gemäß Modellberechnungen ergeben sich in APV-Anlagen im Optimalfall Produktivitätssteigerungen in der Landwirtschaft (Ertrag der Kultur plus Solarstrom) von bis zu 60-70 % (Dupraz, et al., 2011, Weselek et al., 2019), im trockenen Hitzesommer 2018 sogar um 90 % (Trommsdorff et al., 2021), wie in einem Versuch mit einer hoch-aufgeständerten Anlage in Baden-Württemberg nachgewiesen wurde (Abbildung 14). Dies führte zur Erhöhung der Flächenproduktivität in einem trockenen Jahr in der Kombination Kartoffelanbau / APV auf 1,86.

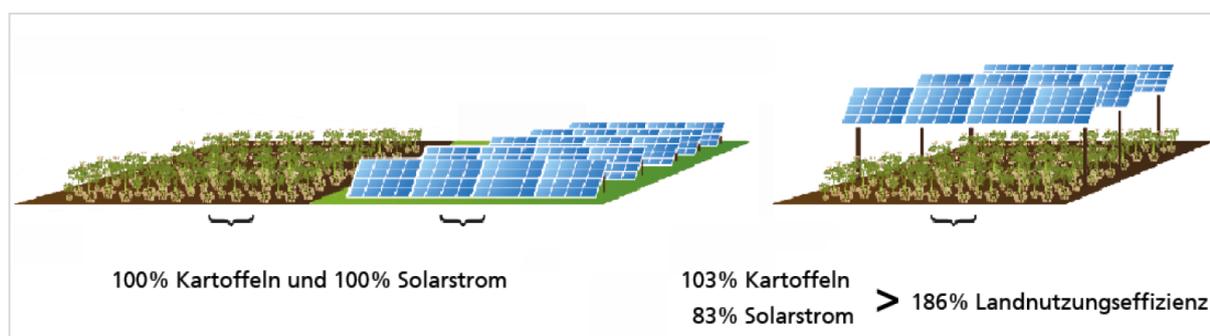


Abbildung 14: Flächennutzungspotential eines Hektars Ackerland (Trommsdorff et al., 2020).

¹ LER ist ein Akronym für engl. „land equivalent ratio“. Die Landnutzungsrate stellt die Summe der relativen Erträge (Strom, Pflanzen) in Prozent dar und liegt meist über 100.

Die **Verschattung der Pflanzen im APV System** kann je nach Abdeckung durch Module bzw. deren Transmissivität oder deren Steuerung (anti-tracking, s. Kapitel 3.1.3) und je nach Kulturpflanzenart auch zu Ertragsverlusten führen (s. Kapitel 5.5, 5.6). In der Fruchtfolge unter der Anlage in Baden-Württemberg wurden sowohl Ertragssteigerungen der Kulturpflanzen als auch Verluste in den Beobachtungsjahren registriert. Unter APV kann die Evapotranspiration von Kulturpflanzen um 10-30 % reduziert sein, wenn das verfügbare Licht nur noch 50-70 % der vollen Sonneneinstrahlung entspricht (Marrou et al., 2013a).

Die Berechnung von Ertragsverlusten ist zudem abhängig von den klimawandelbedingten Stressbedingungen, denen die Pflanze ausgesetzt ist, weshalb als Referenzwert eines Ertrages ohne PV Module immer auch der aktuelle, und der zukünftig zu erwartende Ernteausfall, wie bereits ausgeführt, heranzuziehen ist. Dies relativiert einen möglichen Ertragsverlust weniger schattentoleranter Kulturpflanzen, die ohne APV unter Klimawandel auch einen Verlust einfahren würden (Abbildung 15).

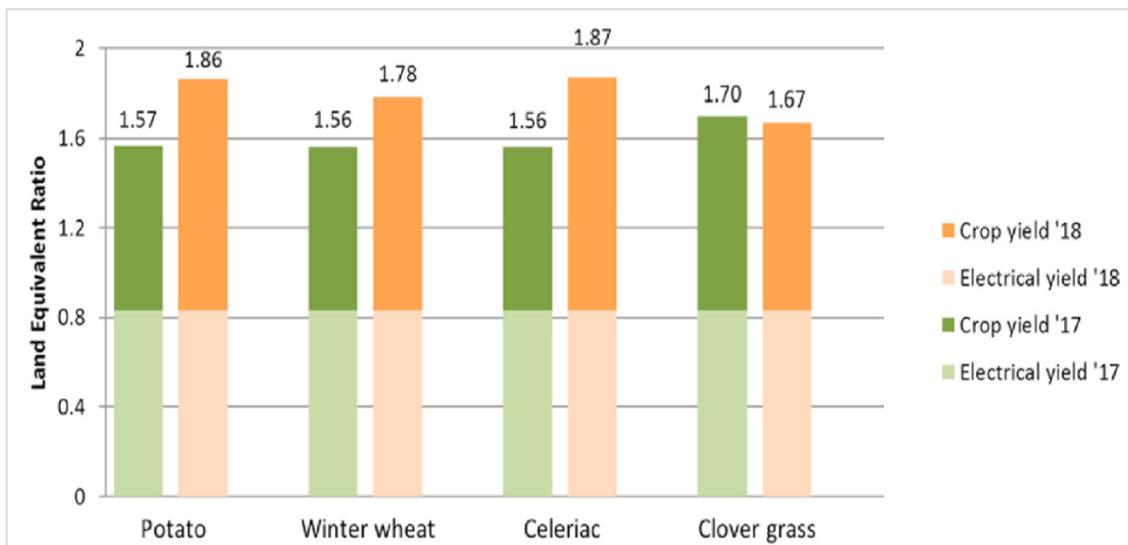


Abbildung 15: Flächeneffizienz von vier Anbaukulturen gemessen über zwei aufeinanderfolgende Jahre unter variierenden Wetterbedingungen (Trommsdorff et al. 2021).

APV-Anlagen dürften aber nicht nur zu einer Stabilisierung von Ernteerträgen unter Stressbedingungen und Erhöhung der Flächenproduktivität beitragen, sondern bieten auch ein Potential zur Steigerung der Biodiversität, beispielsweise wenn die Anlagen mit Blühstreifen oder einer Umrandung aus Gehölzen (s. Kapitel 3.5.3) kombiniert werden. Auch auf intensiv, aber ebenso auch extensiv genutztem **Grünland** kann mit marginalen Anpassungen auf der PV-Seite Strom generiert werden, hier kommen besonders bodennahe und vertikal aufgestellte Module mit einem hohen Potential für Ökosystemdienstleistungen in Frage. **Des Weiteren ist zu bewerten, dass eine stabile, zusätzliche Einkommensquelle für Landwirtschaftsbetriebe generiert und damit die Resilienz vieler Höfe gegenüber Ernteausfällen erhöht werden kann.**

Der Deutsche Bauernverband nimmt positiv Stellung zur APV, so der Stellvertretende Generalsekretär, Udo Hemmerling (Bauernverband, 2021):

„Da herkömmliche Freiflächenanlagen mit erheblichen Eingriffen in Agrarstruktur und Umwelt verbunden sind, brauchen wir Lösungen wie die Agri-PV, die in bestehende Strukturen integriert werden kann und keine zusätzlichen Flächen verbraucht. Denn insbesondere für Anwendung im Obstbau und bei Sonder- und Dauerkulturen sind durch Agri-PV Synergien zu erwarten, beispielsweise um Obst, Beeren und Wein vor Hagel, Starkregen, Frost und Sonnenbrand zu schützen. Nur wenn die landwirtschaftliche Bewirtschaftung ohne nennenswerte Einschränkungen möglich bleibt, kommen die Vorteile der Agri-Photovoltaik wirklich zum Tragen.“

Auch der Thüringer Bauernverband (TBV) unterstützt in seinem Positionspapier vom 16.02.2022 die APV, und fordert eine Förderung der APV auf Acker- und Grünlandflächen (Horn, 2022).

Die neue Bundesregierung hat folgende Planungen für PV (BMWK, 2022):

- Öffnung der Standortkulisse für neue PV-FFA
- Beschleunigung der Genehmigungsprozesse
- Änderung der Schutzgüterabwägung zugunsten Erneuerbarer Energien bzw. dem Klimaschutz: **zeitlich befristeter Vorrang für Erneuerbare Energien** bei der Schutzgüterabwägung soll geschaffen werden
- Rechtsänderungen zur Beschleunigung der langwierigen Verfahren beim Netzausbau
- Gesetzliche Klarstellung, wonach die Erneuerbaren Energien im **überragenden öffentlichen Interesse** sind und der **öffentlichen Sicherheit** dienen.

In der Pressemitteilung vom 10. Februar 2022 nehmen die Minister*innen von drei Ministerien Stellung:

Bundeswirtschaftsminister Robert Habeck: „... *Wir legen heute einen Vorschlag vor, der einen maßgeblichen Beitrag zum Ausbau der Photovoltaik leisten kann. Das bringt den Klimaschutz voran und behält gleichzeitig die Belange der Landwirtschaft und des Naturschutzes im Auge.*“

Bundesumweltministerin Steffi Lemke: „... *Den erforderlichen Ausbau der Freiflächen- und Agri-PV wollen wir naturverträglich gestalten: durch Kopplung an Naturschutzkriterien, die gleichzeitige Wiedervernässung von Mooren und eine Erweiterung der Flächenkulisse in benachteiligten Gebieten. Das ist gut für Umwelt- und für Klimaschutz.*“

Bundeslandwirtschaftsminister Cem Özdemir: „... *Agri-Photovoltaik ermöglicht es unseren Landwirtinnen und Landwirten, einen Beitrag zur Versorgung mit erneuerbaren Energien zu leisten und landwirtschaftliche Nutzflächen trotzdem weiter bewirtschaften zu können. Unser*

Vorschlag beinhaltet Chancen für alle drei Bereiche, also ein Win-Win-Win für Klima, Natur und für unsere Landwirtschaft.“ Ein wichtiges Problem ist **die fehlende Verfügbarkeit von Flächen** (BMWK, BMUV, & BMEL, 2022).

Zur **Abschätzung des Flächenpotentials in Deutschland** sind folgende Fakten einzubeziehen (in Anlehnung an Wirth, 2022, Schindele, 2021):

- Allein die derzeit **mit Energiemais angebaute Fläche** (1 Mio. ha) würde im APV System **600 GWp** Nennleistung Energie erzeugen
- Bei der Produktion von Strom aus **Energiepflanzen** liegt der auf die Einstrahlung bezogene Wirkungsgrad deutlich unter 1 %, für Energiemais bei 0,2 %
- Auf die Einstrahlung bezogen erzeugen neu **installierte PV-Kraftwerke** Strom **im Mittel mit Wirkungsgraden** von ca. **16 – 18 %**
- Auf die Fläche bezogen ist die Stromproduktion im **APV System** mit ca. 600 MWhel/ha um den **Faktor 32** besser als durch Mais, mit 18,7 MWhel/ha Stromertrag durch Silomais (FNR, 2020)
- Im Vergleich der Effizienz von **Biokraftstoffen** kann ein PKW (Diesel-Verbrennungsmotor, 5,5 l Biodiesel/100 km) mit dem Jahresertrag eines 1 ha großen Rapsfeldes von 1.775 l/(ha*a) (FNR, 2020) eine Strecke von ca. 32.000 km zurücklegen
- Mit **Strom aus einer APV-Anlage** (landwirtschaftliche Ernte und Stromproduktion) könnte ein E-Auto einen Weg von **3.750.000 km** fahren (**Faktor 116**)
- Auf ca. **vier Prozent der landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland** könnte der derzeitige **gesamte, aktuelle Strombedarf** (Endenergie, ca. 500 GWp installierte Leistung) in Deutschland gedeckt werden
- Auf 1,4 % der gesamten Ackerfläche aller EU-Mitgliedsstaaten und Großbritannien könnte die Stromnachfrage der EU-Bevölkerung aus dem Jahr 2016 dreimal gedeckt werden
- Der **gesamte Energiebedarf der Menschheit** könnte mit **APV** auf knapp **1 % der Ackerfläche** gedeckt werden (Schlegel, 2021). Das globale Potential der APV wird von verschiedenen Autoren als ausreichend für die Energieversorgung von mehr als 10 Milliarden Menschen eingeschätzt (Adeh et al., 2018, Miskin, et al., 2019).

Zusammenfassend, angesichts der derzeitigen Unsicherheiten in der Energieversorgung und der Preissteigerungen für fossile Brennstoffe, und der klimabedingten Ertragsverluste in der Landwirtschaft ist die Aussage von H.-J. Fell, energy watch group, weiterhin um so mehr gültig: „Die APV kann die durch zunehmende Dürren entstehenden Ernteeinbußen mit Beschattungswirkung und optimiertem Wassermanagement deutlich abmildern, die Biodiversität auf den

Äckern deutlich erhöhen und hilft gleichzeitig, klimaschädliche Kohle- und Erdgaskraftwerke schneller abzuschalten.“ (Photovoltaik.EU, 2020)

Eine Transformation der Landwirtschaft hin zu einer diverseren, regenerativen Landwirtschaft, mit an die zukünftigen Klimabedingungen angepassten Kulturen und Anbauweisen *und* die Energiewende sind angesichts der Kalamitäten dringend notwendig. Die Frage ist, ob ‚*by design or by disaster*‘... (Sommer & Welzer, 2014).

3 Stand der Technik

Die APV bietet verschiedene technische Ansätze sowohl in der Auswahl der Modultechnik als auch der Aufständering. **Aufbau einer APV-Anlage** (Abbildung 16): Jede Anlage benötigt Pfeiler (2), die die Module (3) tragen oder die Verstrebung (1) stützen und damit eine Verankerung (4) im Boden möglich machen. Wichtige Kenngrößen sind hierbei die Modulbreite w (von Modulunterkante bis -oberkante), der Neigungswinkel des Moduls β , der Abstand zwischen den Modulen d (oft auch als Reihenabstand bezeichnet), der Abstand der Pfeiler d_{pillar} und die Höhe des Systems h , welche von Boden bis Modulunterkante bemessen wird.

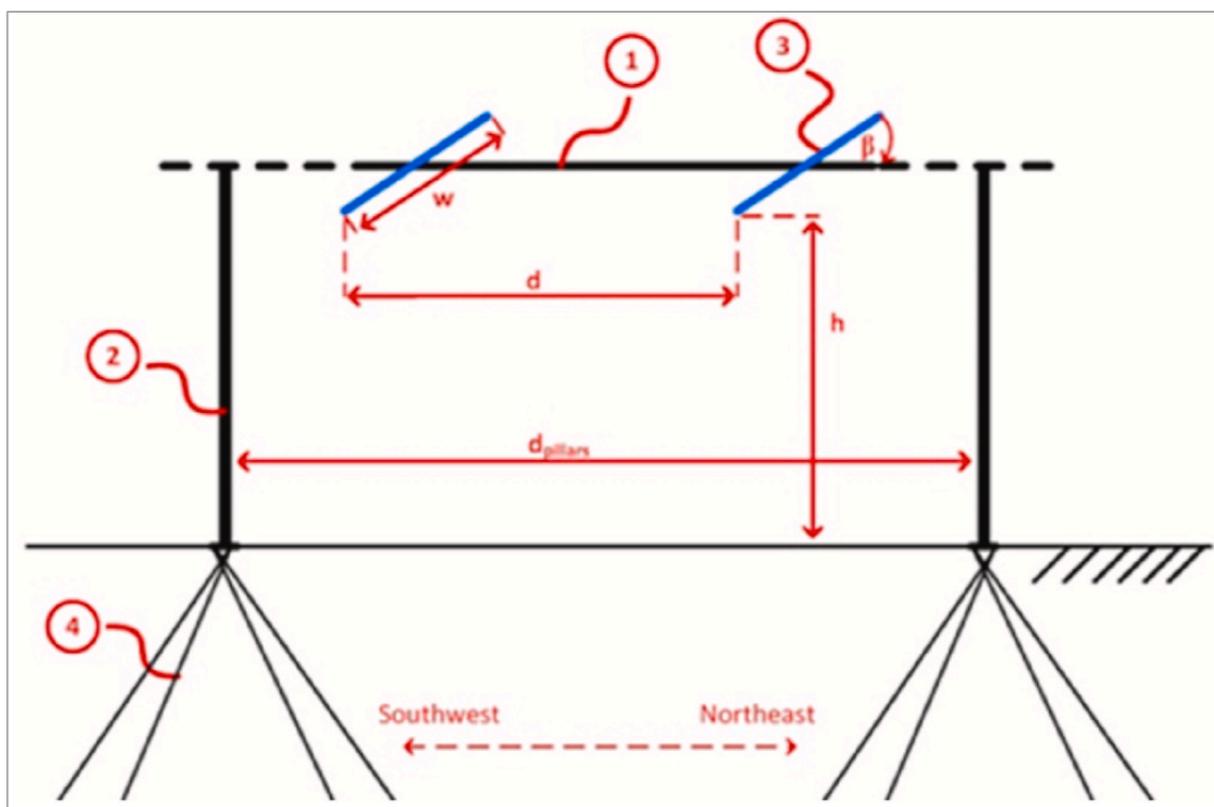


Abbildung 16: Skizze der Seitenansicht einer APV-Anlage mit Verstrebung (1), Pfeiler (2), PV-Modul (3), Boden-Verankerung (4), Modulbreite w , Neigungswinkel β , Reihenabstand d , Pfeilerabstand d_{pillar} und Systemhöhe h (Trommsdorff et al., 2021).

Die APV wird in folgende Kategorien gegliedert (Willcockx, 2020): APV (Ackerflächen), Weideland-Photovoltaik („rangevoltaics“), APV in offenen (PV-FFA) und geschlossenen Systemen (Gewächshaus-PV). Zu APV auf Freiflächen zählen konventionelle Ackerkulturen (Getreide,

Mais, Kartoffeln, etc.) und Sonderkulturen (Obstbau, Wein, Hopfen, etc.) sowie gartenbauliche Kulturen (Gemüse, Kräuter, etc.). Auch findet eine Unterscheidung in mehr oder weniger hoch- und bodennah aufgeständerte Systeme statt, sowie in dynamische (tracking – dem Stand der Sonne folgend) und statische Systeme (feststehend). Auch das Ziel der APV-Anlage kann als Differenzierungsmerkmal verstanden werden: einerseits primär eine Stromproduktion, eine primär landwirtschaftliche Produktion („Anti-Tracking“) oder ein integriertes System. Diese Einteilung entspricht im Wesentlichen der vom Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme (ISE) vorgeschlagenen.

In der **DIN SPEC 91434**, eine vom Fraunhofer ISE gemeinsam mit 14 Initiatoren erarbeitete Vornorm zur Definition von APV-Anlagen, werden klar die Bedingungen für eine APV Anlage auf Ackerland definiert und vorgeschrieben (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021). Sie unterteilt die APV in zwei Kategorien: **Kategorie I** umfasst (hoch-)aufgeständerte Systeme, die eine Bewirtschaftung darunter und einen ausgeprägten Schutz der Kulturpflanzen vor Umweltstress (Sonnenbrand, Starkwetterereignisse, etc.) gewährleisten, sowie **Kategorie II** mit vertikalen bzw. bodennahen Systemen, die eine Bewirtschaftung zwischen den Modulen erlauben und bisher hauptsächlich im Grünland verwendet wurden. Als weitere Kategorie, die allerdings in der DIN SPEC nicht behandelt wird, könnten **Gewächshäuser** gelten, die mit PV-Modulen diverser Form ausgestattet werden. Diese geschlossenen Systeme der PV werden hier nicht näher betrachtet.

3.1 Aufständigung

In **Kategorie I der DIN SPEC 91434** werden **leicht und hoch-aufgeständerte APV-Anlagen** eingeordnet, die mindestens eine lichte Höhe von 2,1 m aufweisen und eine Bewirtschaftung *darunter* ermöglichen. Die **Kategorie II beinhaltet bodennahe Anlagen** mit einer lichten Höhe unterhalb von 2,1 m, bei denen die Bewirtschaftung *zwischen* den Modulen erfolgt.

3.1.1 Hoch-aufgeständerte Anlagen / Kategorie I

Hoch-aufgeständerte Anlagen (Kategorie I) sind so konzipiert, dass sie möglichst mit konventionellen, im Betrieb vorhandenen, landwirtschaftlichen Geräten bewirtschaftet werden können (Abbildung 17). Allerdings schränken die Anlagenhöhe h und der Pfeilerabstand d_{pillar} die landwirtschaftliche Maschinenauswahl ein. Die Solarmodule können in unterschiedlichen Abständen, Ausrichtungen und Winkeln angebracht werden. Die Anlage kann dabei teilweise oder komplett die landwirtschaftliche (nutzbare) Fläche überdachen, was aber, in Abhängigkeit von der Auswahl und Anordnung der Module verschiedene Verschattungsgrade zulässt.

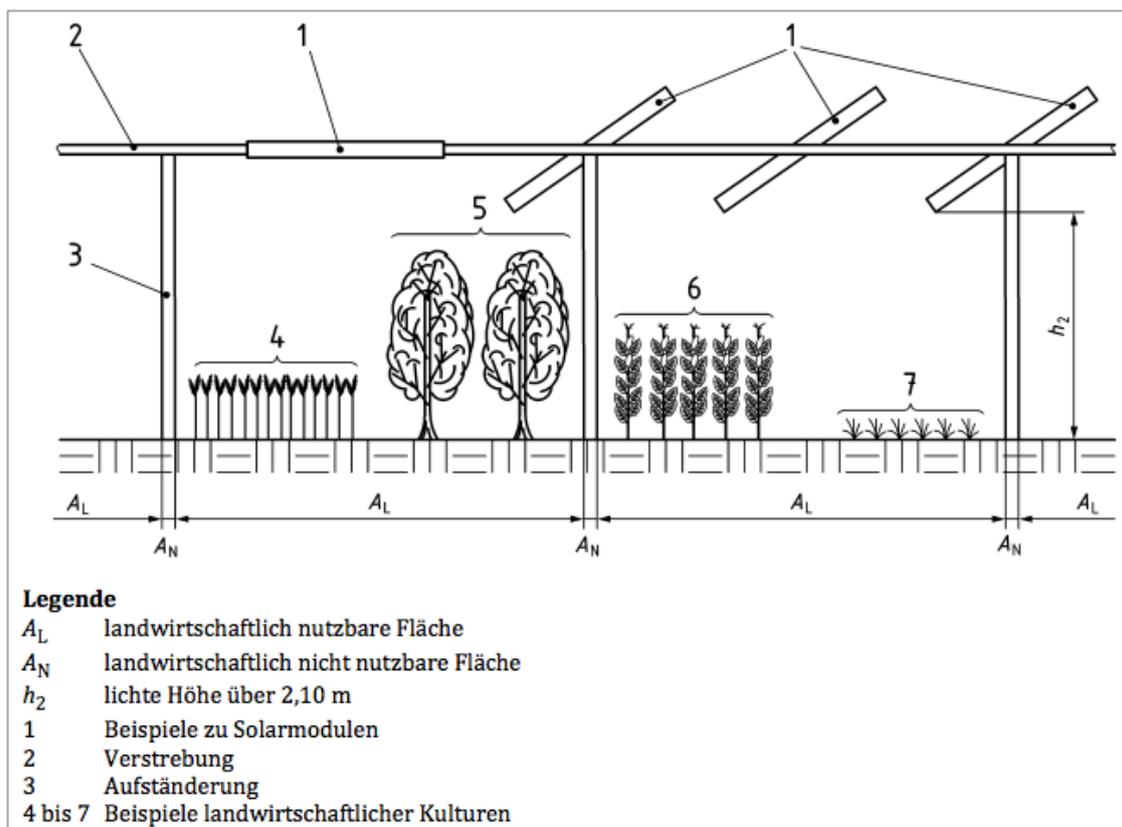


Abbildung 17: Darstellung APV-Anlage Kategorie I nach DIN SPEC 91434 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021).

Oft sind Anlagen vier bis sechs Meter, mindestens aber 2,1 m hoch und die Stützpfeiler zwischen 6 m und 14 m (häufig 10 m) voneinander entfernt. Der Reihenabstand entspricht hierbei der landwirtschaftlich nutzbaren Fläche A_L (Trommsdorff et al., 2020). Bei dieser Form der APV können Kulturen unterschiedlichster Art angebaut werden, darunter auch hochwachsende Kulturen, wie sie bspw. im Obstbau vorkommen. In bisherigen Pilotanlagen werden zumeist semitransparente Module verwendet, um eine ausreichende photosynthetisch aktive Strahlung (PAR^2) für das Pflanzenwachstum zu gewährleisten (s. Kapitel 3.2.1). Dies ermöglichen kleinere Reihenabstände zwischen den Modulreihen und damit eine höhere Flächenbelegungsrate der Module (GCR^3) sowie eine höhere LER. Durch die hohe Aufständerung und den damit verbundenen, höheren Materialaufwand ist von höheren Investitionskosten auszugehen (s. Kapitel 8), da hohe statische Anforderungen an die Konstruktion wegen Windlast entstehen (Trommsdorff et al., 2020, Scharf et al., 2021).

Der Vorteil dieser Konstruktion ist der **Schutz der Kulturpflanzen** bspw. vor Hagel, Starkregen oder Sonnenbrand (Badelt et al., 2020). Aufgrund der landwirtschaftlichen Arbeiten ist ein

² **PAR** ist ein Akronym für engl. „photosynthetically active radiation“. PAR gibt die Auswirkung elektromagnetischer Strahlung im Bereich des Lichtspektrums auf die photosynthetische Aktivität von Pflanzen in W/m^2 an.

³ **GCR** ist ein Akronym für engl. „ground cover ratio“. Die Flächenbelegungsrate gibt die Belegung der Grundfläche mit Modulen in Prozent an. Eine vollständige Belegung entspricht 100%.

Verschmutzen der Module durch Bodenbearbeitung, Erntestaub, Blüte, etc. möglich. Inwiefern eine Reinigung der Module nötig und wirtschaftlich sinnvoll ist, muss vom Standort und den standortspezifischen Niederschlägen abhängig gemacht werden. Bei den Anlagen der Kategorie I entsteht ein Flächenverlust von maximal 10 % (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021).

Bei **Sonderkulturen** sind die Anlagen oft etwas niedriger aufgeständert, da häufig keine maschinelle Ernte üblich bzw. notwendig ist. Die Unterkante der Module ist hier mindestens 2,10 m und üblicherweise 5 m hoch (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021). Ausnahme bildet hierbei die Sonderkultur Hopfen mit einer Höhe von bis zu 7 m (s. Kapitel 5.1). Die Pfeilerabstände betragen zwischen 3 m und 14 m, je nach Kultur, da die Aufständierungen oft als Rankhilfe verwendet werden, wobei ein Flächenverlust von unter 1 % entsteht, wenn die Aufständierung als Rankhilfe genutzt wird, wie beispielweise im Himbeeranbau (Abbildung 18) (Karthaus, 2021). Ansonsten wird nach DIN SPEC 91434 von einem maximalen Verlust der Fläche von 10 % in Kategorie I ausgegangen (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021). Die Investitionskosten sind entsprechend der benötigten Höhe des Systems als geringer einzuschätzen als bei hoch-aufgeständerten Anlagen.

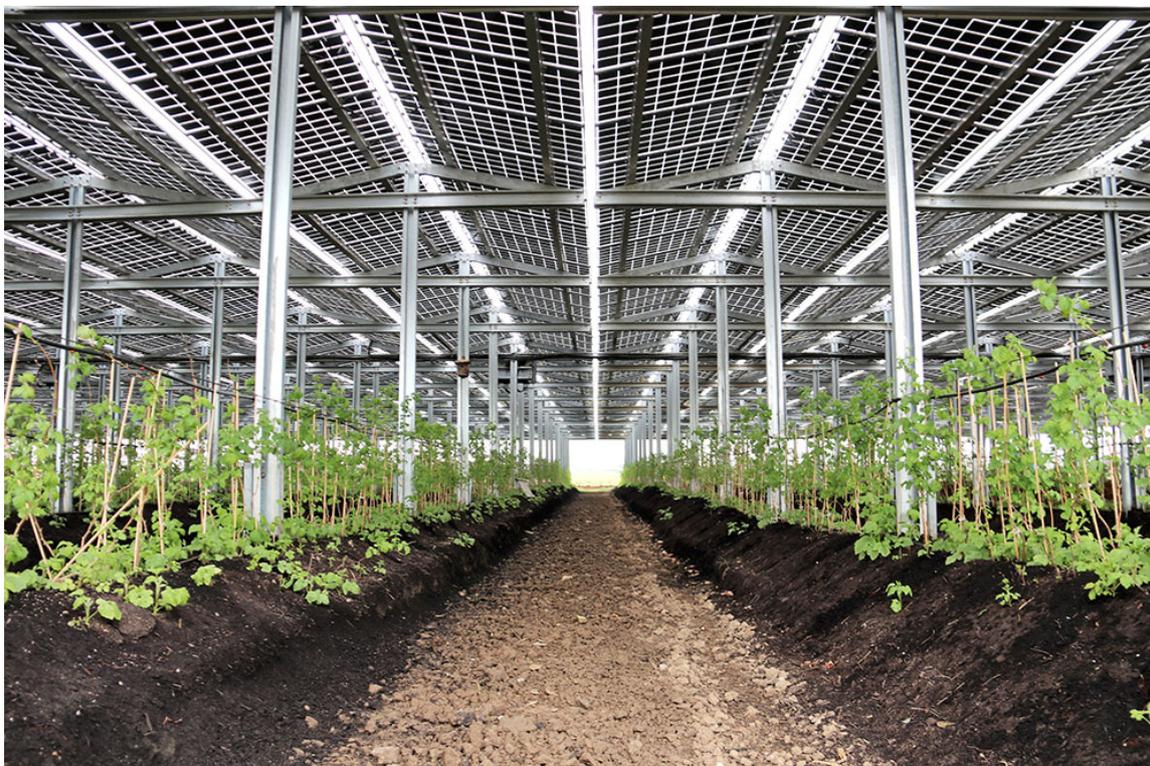


Abbildung 18: Darstellung APV mit Sonderkultur Himbeeren, welche Aufständierung als Rankhilfen verwenden (Karthaus, pers. Zusendung).

3.1.2 Bodennahe Anlagen / Kategorie II

Kategorie II beinhaltet die **bodennahen APV-Systeme**, bei denen eine Bewirtschaftung *zwischen* den Modulreihen erfolgt. Die lichte Höhe des Systems beträgt maximal 2,1 m. Die Fläche unter den Modulen (2,1 m maximal hoch) gilt hier zumeist als landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche (A_N). Ist dennoch eine Bearbeitung direkt unter den Modulen möglich und wird ein Ertrag von mindestens 66 % erreicht, so reduziert sich die Fläche A_N . Dies gilt es jedoch in einem Nutzungskonzept festzuhalten (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021). Die Pflanzen erhalten einen sehr hohen Lichteinfall, da die Module nicht über den Pflanzen angebracht sind. Allerdings entfällt so auch die schützende Wirkung vor den meisten Umwelteinflüssen außer vor Wind, sowie die Möglichkeit des Lichtmanagements.

Die Maschinenhöhe kann frei gewählt werden und die Reihenabstände können entsprechend an die landwirtschaftlichen Maschinen angepasst werden. Es ist kein Regenwasserauffangsystem mit einer Wasserverteilung notwendig, da die Pflanzen uneingeschränkt Zugang zu Niederschlägen erhalten (Scharf et al., 2021). Bei den bodennahen Anlagen wird ein Flächenverlust von maximal 15 % anberaumt (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021). Durch die geringe Aufständehöhe sind die Kosten der Anlagen der Kategorie II als niedriger einzuschätzen.

Es wird unterschieden zwischen APV-Anlagen der Varianten 1 und 2, bei denen die Solarmodule auf einem oder zwei Pfeilern in einem Winkel zwischen 10° und 60° (Süd-Ausrichtung) bzw. zwischen 0° und 20° (Ost-West-Ausrichtung) (Kümpel, 2022) fest aufgebaut sind (**Variante 1**) (Abbildung 19), oder APV-Anlagen, deren Module vertikal (VA) oder mit einem Trackingsystem installiert sind (**Variante 2**) (Abbildung 20).

Variante 1 (Abbildung 19): Bei diesen bodennahen APV-Anlagen werden die Module auf einem oder zwei Pfeilern fest installiert. Die Fläche direkt unterhalb der Module ist kaum landwirtschaftlich nutzbar. Durch die geringe Aufständehöhe sind die Kosten dieser Anlagenform als die niedrigsten unter den in dieser Studie beschriebenen APV-Anlagen einzuschätzen.

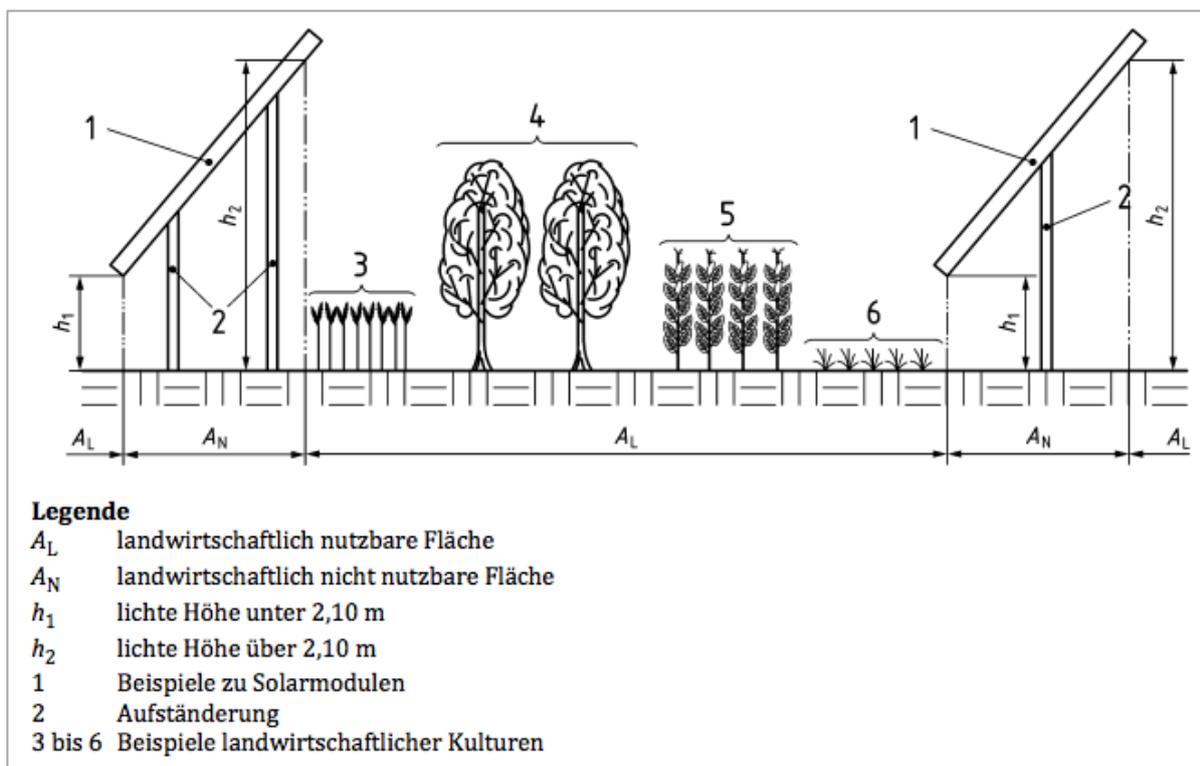


Abbildung 19: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 1 nach DIN SPEC 91434 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021).

Variante 2 (Abbildung 20): **Vertikale Anlagen** werden bisher häufig im Grünland errichtet. Da diese meist in Richtung Ost-West ausgerichtet sind, erzeugen sie statt einer typischen „Glockenkurve“ eine „Kamelkurve“, wobei die typische Mittagsspitze der Stromproduktion auf den Vor- und Nachmittag verteilt wird und somit die Möglichkeit einer alternativen Vergütung bzw. eines günstigeren Netzanschlusses bestünde (Fuhs, 2017). Verwendet werden bifaziale Module (s. Kapitel 3.2.2), deren Vorder- und Rückseiten abwechselnd nebeneinander angeordnet sind, wodurch je nach Tageszeit eine gleichmäßige Leistung erzielt wird. Oft werden zwei Module übereinander angebracht, mit der Unterkante in einer Höhe zwischen 20 cm und 80 cm über dem Boden, und der Oberkante in maximal 3 m Höhe. Größere Höhen würden wegen höherer Windlasten höhere Ansprüche an die Statik aufweisen und wären kostenintensiver (Next2Sun GmbH, 2021). Diese Anlagen eignen sich hervorragend als Windfang und bieten an besonders windigen Standorten eine Schutzfunktion. Die mögliche Nachführungsfunktion dieser Module wird im nächsten Abschnitt erläutert.

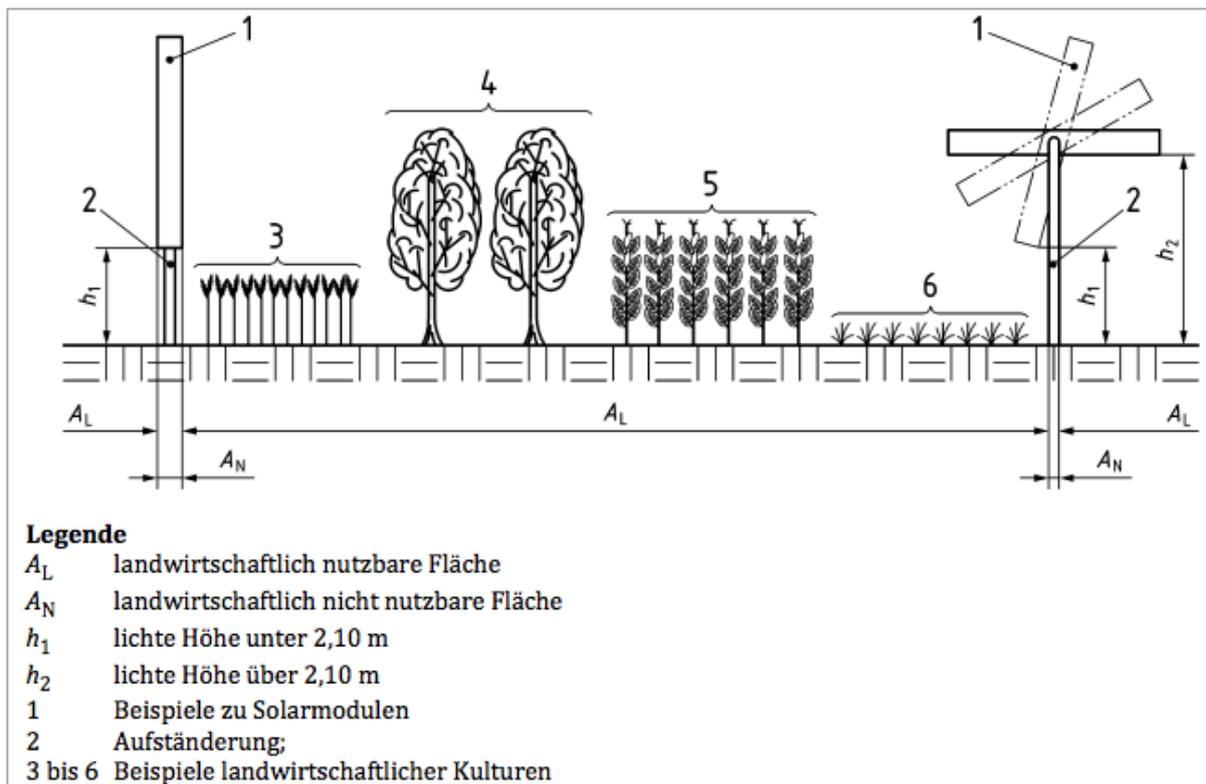


Abbildung 20: Darstellung APV-Anlage Kategorie II, Variante 2 nach DIN SPEC 91434 (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021).

3.1.3 Tracking-Systeme

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

PAR-Level der Pflanzen erhöht. Dies ermöglicht vor allem eine saisonale Steuerung der Module, um bspw. in kritischen Entwicklungsphasen eine höhere PAR zu gewährleisten, als es mit fixierten Modulen möglich wäre. Dennoch wäre so die Option gegeben, eine höhere GCR zu wählen, da der Lichteinfall spezifisch gesteuert werden kann. Die unterschiedlichen PAR-Ausbeuten und Leistungspotentiale zwischen Tracking-, Anti-Tracking- und konventionellen APV-Systemen sind in Abbildung 21 dargestellt.

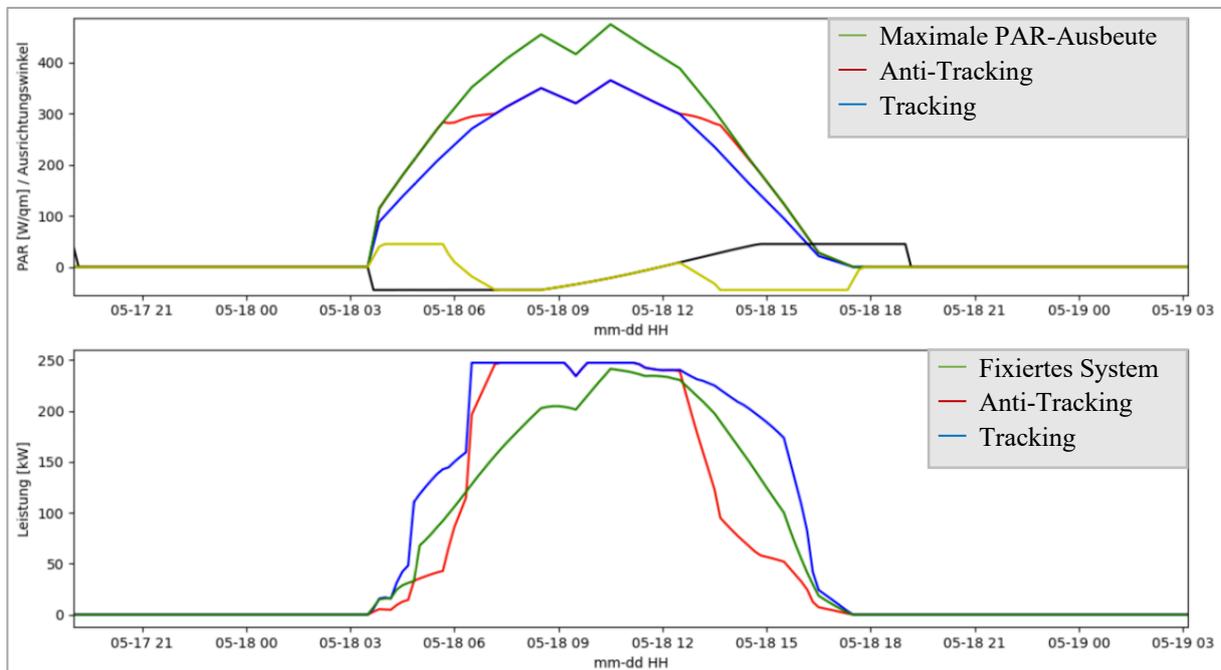


Abbildung 21: Simulation der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) der Pflanzen in den Varianten Tracking, Anti-Tracking und feststehend (oben), sowie die Leistungsverläufe der Module der drei Varianten (unten) [verändert nach Hörnle et al. (2021)].

Der Schutz der Pflanzen vor Umwelteinflüssen ist bei Tracking- bzw. Anti-Tracking-APV-Anlagen besonders erwähnenswert. Durch die Nachführung ist es nicht nur möglich, die Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Fläche zu vereinfachen, den Stromertrag zu regulieren oder die PAR der Pflanzen zu erhöhen, sondern es kann entsprechend der Wetterereignisse auch ein umfassender Schutz der Kulturen vor Hagel, Schneefall, Starkregenereignissen, Frost und Sonnenbrand erfolgen (Abbildung 22).

Damit bestehen die **Optionen durch (Anti-)Tracking-Systeme:**

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

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

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



Abbildung 22: Mögliche Schutzwirkungen der Kulturen durch verschiedene Ausrichtungswinkel bei (Anti-)Tracking-Systemen (Vandest & Hemetsberger, 2021).

3.1.4 Innovationen

Es ist erkennbar, dass eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Konstruktion eines APV-Systems bestehen. Da der Markt der APV international sehr dynamisch ist, werden hier im Folgenden einige **neue „Trends“ und Innovationen** vorgestellt. Diese geben einen Ausblick auf **zukünftige, potenzielle Systemdesigns**.

3.1.4.1 Seilaufhängung

Anstelle einer massiven, statischen Konstruktion kann eine alternative Aufständermöglichkeit mit **Seilaufhängung** verwendet werden (Abbildung 23). Die Technik der Draht- oder Stahlseile stammt aus der Seilbahntechnik. Ein erheblicher Teil der eigentlich massiven Stahlkonstruktion kann so durch weniger materialaufwändige Seile ersetzt werden. Durch die Seilverbindungen sind Fundamentabstände von bis zu 40 m möglich, welche die Chance bieten, auch große Maschinenbreiten zu verwenden. Dafür sind allerdings Module in Leichtbauweise (s. Kapitel 3.2.3) notwendig.



Abbildung 23: Modell einer Seilkonstruktion mit ‚Tracking‘-Funktion für eine APV-Anlage in Sachsen (VEE Sachsen e.V., 2022).

Für die Seilkonstruktion inkl. der Aufständering werden ca. 10 % der Kosten der massiven Stahl-Aufständering veranschlagt (Badelt et al., 2020). Da Module in Leichtbauweise bisher noch nicht in der Massenproduktion üblich sind, beeinflussen sie die Investitionskosten noch erheblich. Durch verschiedenartige Anordnungen der Module bzw. die Verwendung von semi-transparenten Modulen (s. 3.2.1) kann die Erreichung der notwendigen PAR gewährleistet werden. Damit sind diese Anlagen in Zukunft als wirtschaftlich attraktiv einzustufen (s. Kapitel 8). Nach Hörnle et al. (2021) sind die Anlagen bezüglich mikroklimatischer und verschattungsbedingter Einflüsse noch zu optimieren. Je nach Anordnung der Leichtbaumodule besteht die Möglichkeit Regenwasser aufzufangen. Bisher wurde bereits eine Pilotanlage in Straßkirchen (Deutschland) mit einem abgespannten Drahtseil-System errichtet (Abbildung 24). Die einzelnen Stahlpfeiler werden hier mit Drahtseilen statisch gesichert.



Abbildung 24: Pilotanlage mit abgespannter Seilaufhängung in Straßkirchen, Bayern (Krunner Carport GmbH, Harlander, 2021).

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

3.1.4.2 Faltdachanlagen

Die Verwendung von **Faltdachanlagen** stellt eine interessante Innovation dar, da sie die Möglichkeit bietet, die Anlage ein- und auszufahren, bspw. bei der Bewirtschaftung oder Ernte des Feldes, bei Schneefall oder Sturm, nachts, oder bei Wartungsarbeiten (Abbildung 25). Auch hier werden Module in Leichtbauweise verwendet. Die Unterkante muss eine Mindesthöhe von 2,10 m aufweisen (Deutsches Institut für Normung e.V., 2021). Das Faltdach wird ebenfalls über Draht- oder Stahlseile aufgehängt, sodass auch hier Fundamentabstände von bis zu 40 m möglich sind. Durch Abstandshalter ist das System auch für APV-Anlagen geeignet und bietet die Möglichkeit, auch reihenweise eingefahren zu werden, sodass ein optimales Lichtmanagement gegeben ist. Zudem kann Regenwasser aufgefangen werden und es sind sowohl Reinigungsarbeiten als auch Feldbearbeitung erleichtert durchzuführen. Durch die beweglichen Teile ist, wie auch bei den nachgeführten Anlagen, ein höherer Wartungsaufwand

gegeben. Dadurch und da es sich bisher immer um Sonderanfertigungen handelt, sind die Faltdachanlagen aktuell noch sehr kostenintensiv (Monn, 2021).

Bei Starkwind kann die Anlage eingefahren werden, sodass potentielle Schäden der Anlage reduziert werden können, was die Ansprüche an die Statik reduziert. Allerdings ist dann auch kein Schutz der Pflanzenkulturen vor Stürmen gewährleistet. Aus Sicht der Stromproduktion wird in **Thüringen** aktuell von **Stromertragsverlusten von unter 1 %** ausgegangen, wenn bei Windstärken über 15 m/s das Solardach eingefahren würde. Diese Verluste werden jedoch reduziert, wenn die Verluste durch Schneebeleg gegengerechnet werden. In schneereichen Regionen können hier bis zu 3 % zusätzlicher Ertrag erwirtschaftet werden. Ein weiterer Vorteil besteht bei Faltdachanlagen darin, dass die Anlage bis auf die Unterkonstruktion werkseitig montiert werden kann. Somit wäre eine Neupositionierung der APV-Anlage mit geringerem Aufwand möglich und es werden Kosten beim Auf- und Abbau eingespart. Damit entfällt hier eine Standortbindung über viele Jahre, was auch eine Flexibilisierung in der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung der Fläche ermöglicht. Bei speziellen Solarfaltanlagen werden die PV-Module beim Ein- und Ausfahren in bzw. aus einer Box gereinigt (Hörnle, et al., 2021).



Abbildung 25: Beispiel einer Faltdachanlage mit Solarmodulen, kommerziell bereits über Parkplätzen und Infrastrukturanlagen (DHP, o.J.).

3.1.4.3 Holzaufständering

Eine weitere mögliche Innovation bestünde darin, die **Aufständering aus Holz anstelle von Stahl** zu errichten. Diese Anlagen verringern den mit der Stahlproduktion verbundenen Ressourcen- und Energieverbrauch und auch den technischen Charakter der Anlage (Abbildung 26). Entsprechend auf Haltbarkeit behandelte Holzständer, ggf. mit einem Spinnanker-Sockel im Boden (s.u.) können Verwendung finden.

Hierbei könnten Investitionskosten eingespart werden, wenn bspw. unbehandeltes Holz verwendet wird. Es besteht allerdings die Gefahr, dass sich das Holz bei extremen Witterungsbedingungen verdreht oder verzieht, wodurch die Leistung des Systems beeinträchtigt werden kann. Daher gilt es zu beachten, dass eine regelmäßige Kontrolle der Holzaufständering notwendig ist, um potentiellen Verfall des Holzes frühzeitig erkennen und behandeln zu können (Rodriguez, 2014).



Abbildung 26: PV-Anlage mit Aufständering aus behandeltem Holz, Montpellier Frankreich (Dupraz, 2020).

Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Aufständering nach dem Rückbau der Anlage unkompliziert recycelt werden kann. In Japan wird zunehmend auf Verwendung von Holzaufständeringen zurückgegriffen, um die lokale Forstwirtschaft zu fördern und die Nachhaltigkeit der Anlage zu verbessern. Wird das Holz entsprechend behandelt, wird eine Lebensdauer des Holzes von 30 Jahren angegeben. Einige Installateure verwenden dagegen unbehandeltes Holz und geben eine Lebensdauer von 20 Jahren an. Durch die Verwendung von einheimischem Holz kann die lokale Wirtschaft profitieren. Weiterhin gelten Holzaufständeringen als brandgefährdeter als herkömmliche Stahlaufständeringen (Rodriguez, 2014). An einer Anlage in Montpellier, Frankreich, wird dieses Konzept aktuell erforscht.

3.1.4.4 Dome-Struktur

Die Errichtung von **Dome-Strukturen**⁴ wird ursprünglich auf Flachdächern oder Freiflächen angewandt, um eine zügige Montage und eine günstige Aufständermöglichkeit zu gewährleisten. Oft werden diese in Ost-West-Richtung aufgeständert, mit einem Neigungswinkel von 5° bis 10° (Abbildung 27).



Abbildung 27: Darstellung Dome-Struktur Ost-West-Ausrichtung der Freiflächenanlage in Hölzengraben, Kaiserslautern (IBC Solar, 2013).

Eine Sonderform der Dome-Struktur sind die Falтанlagen auf Rollen (Abbildung 28). Besonders für **Thüringen** interessant, bietet sich in der APV die Möglichkeit Dome-Strukturen auf fahrbaren Gestellen auf Rad-Schienen-Basis über weißem Spargel aufzubauen. Im November würde die Anlage zeitweilig eingefahren werden, sodass die Beete umgestaltet oder neu angelegt werden können (Bild a). Während der Wachstumsperiode benötigt Spargel keinen Lichteinfall und profitiert von der Erwärmung durch die dunkle Farbe der Module, demnach wird die Anlage ausgefahren und die Dome-Strukturen decken die Beete ab (b). Im Sommer werden die Kuppeln zwischen den Beeten errichtet, um das Unkrautwachstum zu verhindern (c). Eine mobile Anlage auf Rädern wurde kürzlich in den Niederlanden installiert (H2arvester, 2022).

⁴ Dome-Strukturen kommt aus dem Englischen von *dome* für dt. „Kuppel“.

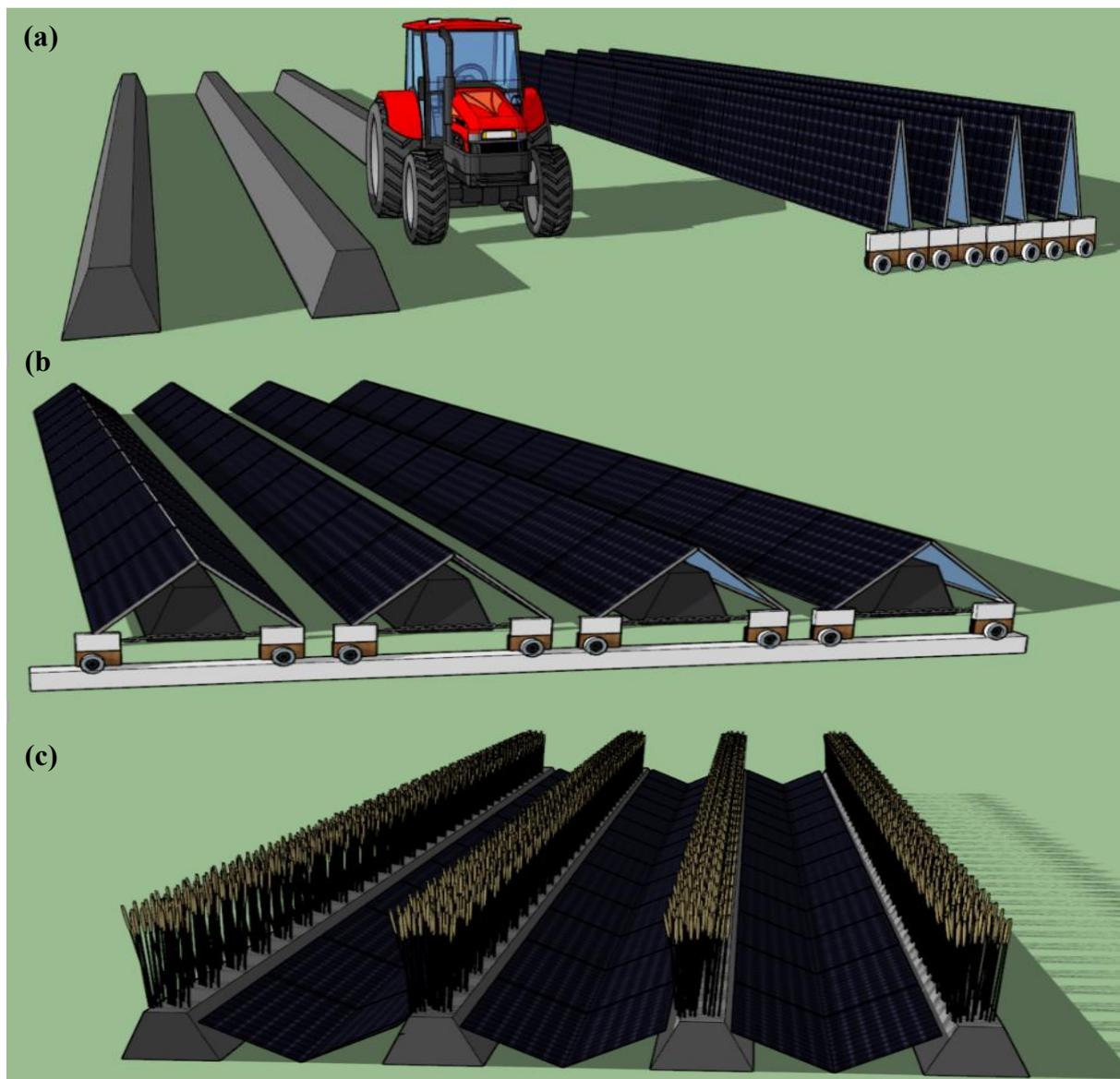


Abbildung 28: Dome-Strukturen über Spargelkulturen auf Rad-Schienen-Konstruktion (Willcockx, 2020).

3.1.4.5 Solarbogen

Durch die Integration der Module in die Unterkonstruktion entsteht eine feste Einheit als **Solarbogen** (Abbildung 29). Dieser ist statisch stabil und bietet die Chance für eine zukünftig kostengünstige APV-Anlage. Durch die statische Konstruktionsweise auf einem integrierten Schienensystem kann der Bogen über große Flächen verschoben werden und bietet damit verschiedene Möglichkeiten zur Beschattung und Belichtung der Pflanzen, als Wetterschutz und zur Bewirtschaftung der Fläche unterhalb der Module. Die Module sind in Ost-West-Richtung mit verschiedenen Neigungswinkeln ausgerichtet. Pfeilerabstände können hier 9 m erreichen bzw. bis zu 20 m² mit Stützpfählern. Damit lässt sich im optimalen Fall eine Flächenbelegung für eine Stromproduktion von 2 MW pro Hektar erreichen, z.B. während einer Brachezeit

zwischen dem Anbau von Kulturen, oder zur Erhöhung der Stromproduktion im Winter. Auch eine Verwendung in der Tierhaltung ist möglich (Abbildung 29).



Abbildung 29: Solarbogen "Modular Arc System" der Firma GoldbeckSolar mit Tierhaltung (Goldbeck, o.J.).

3.2 Module

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

3.2.1 Semitransparente Module

Die Verwendung von **semitransparenten Modulen** birgt den Vorteil der höheren Lichtdurchlässigkeit und damit einer gesteigerten PAR (Abbildung 30). Die Module bestehen oft aus Glas oder lichtdurchlässiger Folie auf Vorder- und Rückseite, wodurch Transparenz zwischen den PV-Zellen entsteht. Die PV-Zellen weisen einen größeren Abstand innerhalb des Moduls auf als bei konventionellen PV-Modulen. Statt des typischen Alu- bzw. Metallrahmens werden Klemmhalterungen verwendet, um auch hier die Transparenz zu erhöhen. Bei üblichen Modulen liegt der Flächenanteil der Zwischenräume bei vier bis fünf Prozent. Werden die Abstände erhöht, so ergibt sich eine größere Fläche, die die Pflanzen vor Wettereinflüssen schützt und mehr Lichttransmissionen ermöglicht (Hopf, 2021, Trommsdorff et al., 2020).



Abbildung 30: Semitransparente Module, hier als Überdachung für Himbeeren, Niederlande (BayWa r.e., 2021).

3.2.2 Bifaziale Module

Bifaziale können rückseitig den Lichteinfall nutzen und somit auf Vorder- und Rückseite der Module Strom produzieren. Hierbei wird von einer Leistung von 85 % auf der Rückseite im Vergleich zur Vorderseite ausgegangen (Next2Sun GmbH, 2021) (Böhm, 2021), wodurch insgesamt bis zu 25 % höhere Stromerträge generiert werden können. Durch die besondere Aufständigung bei den meisten APV-Anlagen erhalten die Rückseiten der bifazialen Module besonders viel Lichtstrahlung. Häufig werden bifaziale Module bei vertikalen APV-Anlagen verwendet, aber auch bei hoch-aufgeständerten. Bei ersteren werden sie wechselseitig angeordnet, um eine ausgeglichene Stromproduktion zu gewährleisten (Abbildung 31). Die Module weisen eine beidseitige Verglasung auf und bieten damit eine homogenere Lichtverteilung unter den Modulen. Als Zellen können auch hier unterschiedliche Zelltypen verwendet werden (bspw. PERC⁵). Bifaziale Module sind heute für den Massenmarkt verfügbar (Trommsdorff et al., 2020, Next2Sun GmbH, 2021).

⁵ „Passivated Emitter and Rear Cell“ ist eine Solarzelle mit Rückseitenpassivierung. Dies ist eine Schicht an der Rückseite des PV-Moduls, welche nicht umgewandelte Lichtwellen an der Rückseite reflektieren, sodass eine Wandlung stattfinden kann. Dadurch erhöht sich der Modulwirkungsgrad.



Abbildung 31: Wechselseitige Anordnung bei bifazialen Modulen in vertikaler Ausrichtung (Next2Sun GmbH, 2021).

3.2.3 Leichtmodule

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

3.2.4 Dünnschicht-Module

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

leistungsfähigste, flexible Module werden die CIGS-Module⁶ genannt, für die kein Silizium benötigt wird, wodurch die PV-aktive Schicht nur wenige Mikrometer stark ist (Abbildung 32) (Flisom AG, 2021).



Abbildung 32: Flexibles Dünnschicht-Modul der Firma Flisom (Flisom AG, 2021).

3.2.5 Organische Module

In Nantes, Frankreich wurden Module aus **organischen Werkstoffen** an Gewächshäusern getestet. Die halbtransparenten, ultraleichten und wenig lichtempfindlichen Module wurden auf der Innen- und Außenseite des Gewächshauses angebracht (Abbildung 33). Untersuchungen zeigten, dass die PAR bei den Pflanzen genauso ankommt, wie bei einem konventionellen Kunststoffgewächshaus, welches das Licht streut. Die dort verwendeten, organischen PV-Module konnten auch in aus- und einfahrbare Systeme integriert werden (Vandest & Hemetsberger, 2021).

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

⁶ Kupfer-Indium-Gallium-Diselenid-(CIGS)-Solarzellen haben einen Absorber mit direkter Bandlücke, weshalb eine geringere Materialdicke notwendig ist als bei Silizium-Solarzellen.



Abbildung 33: Verschiedene Anwendungsmöglichkeiten von OPV bspw. an Gewächshäusern (Vandest & Hemetsberger, 2021).

3.2.6 Farbige Module

Die **farbige Gestaltung der Module** spielt besonders für die Integration in das Landschaftsbild, oder bei bauwerksintegrierter PV in das Gebäudebild eine wichtige Rolle und damit für die Akzeptanz, z.B. bei grünen Modulen zur besseren Anpassung an das Landschaftsbild. Eine Möglichkeit stellt hier auch die Kombination aus OPV und farbigen Modulen dar: rote Module mit Wellenlängenselektion bieten optimale Photosynthesebedingungen. Allerdings ist die Farbgebung mit Einbußen beim PV-Ertrag (minus 7 % - 30 %) und mit derzeit noch höheren Kosten (plus 15 % - 30 %) verbunden (Kutter, et al., 2018). Gewohn et al. (2018) entwickelten eine Technik zur Einfärbung mit Grüntönen mit einem Ertragsverlust von 15 % betragen und einer Preissteigerung um 18 %. Skaleneffekte bzw. die Entwicklung neuer Technologien könnten diese Technik zukünftig zu einer attraktiven Option machen.

3.2.7 Konzentrierende PV

Konzentrierende PV-Module kombinieren eine hohe Ertragsleistung mit einstellbarer Lichtdurchlässigkeit und bieten damit ein hohes Potential für APV-Anlagen (Abbildung 34) (Agroscope, 2021).

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



Abbildung 34: Konzentrierende PV-Module der Firma Insolight über Himbeerkulturen in Conthey, Schweiz (Agroscope, 2021).

3.2.8 Tube Solar

Eine innovative Anlagen-Formation stellt das System der Firma **TubeSolar** AG dar. Hier werden **gerollte PV-Dünnschichtfolien in ein Glasrohr** eingesetzt (Abbildung 35). Damit könnte eine homogene Wasser- und Lichtverteilung generiert werden. Dies ist für verschiedene Kulturen vorteilhaft, da besonders auch hier der Schutz vor Hagel und Starkregen besteht. Aufgrund der runden Oberfläche der Module wird angenommen, dass die Module selbstreinigend sind. Die runden Glasrohre sollen außerdem einen über den Tag gleichmäßigen Stromertrag liefern (Hörnle, et al., 2021). Weiterhin benötigt das winddurchlässige System eine weniger massive Unterkonstruktion, da damit die Windlasten weniger hoch sind. Aktuell wird eine landwirtschaftstaugliche Aufständerung entwickelt, die in Leichtbauweise mit Tragbändern umgesetzt werden soll. Diese Anlagen befinden sich derzeit noch nicht im Praxistest, dies soll aber zeitnah erfolgen (Hörnle, et al., 2021). Der Materialaufwand für die Fertigung wird als gering angenommen. Eine großflächige Überspannung ohne Lückenbildung ist möglich, da die Röhren zu 1 m x 1 m Modulen zusammengeführt werden. Die Tragschienen werden anschließend zu einer Modulgröße von 2 m x 1 m zusammengesetzt. Damit ist eine schnelle und einfache Montage möglich (Hörnle, et al., 2021).



Abbildung 35: Veranschaulichung des Aufbaus und der Konstruktionsweise der Modultechnologie der Firma TubeSolar AG (TubeSolar AG, o.J.).

3.2.9 Anti-Reflexbeschichtung

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

3.3 Fundamentierung

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



Abbildung 36: Direkte Verankerung im Boden von APV-Anlagen mithilfe von Spinnankern (Spinnanker GmbH, 2021).

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

3.4 Regenwasserauffangsystem

Da das Regenwasser auf der Moduloberseite von diagonal ausgerichteten Modulen gebündelt wird und die Abtropfkante die Pflanzen schädigen bzw. den Boden verschlammten könnte, ist ein **Regenwasserauffangsystem** möglich. Dies kann aus einfachen Regenrinnen bestehen, die das Wasser auffangen, abtransportieren und ggf. zu trockeneren Zeiten über Tröpfchenbewässerung den Pflanzen wieder zuführen (Wassermanagementsystem) (Abbildung 37). Hier bestehen unterschiedliche Möglichkeiten der Wasserspeicherung (kurzzeitig oder saisonal). Auch **Drainagen** bieten vor allem bei Sonderkulturen, wie dem Beerenanbau eine attraktive Lösung. So wird die Abtropfkante mittig zwischen den (Beeren-)Reihen platziert. Darunter befindet sich ein Drainagesystem, welches das Wasser über Sammelleitungen zum Speichertank zurückführt (Karthaus, 2021). Das Auffangen von Regenwasser ist aufgrund seiner Wasserhärte besser für Bewässerungszwecke geeignet als Brunnenwasser. Weiterhin kann durch

ein geschlossenes System mit der Sammlung von Be- und Entwässerung und mit Düngemitteln angereichertes Wasser recycelt werden. Durch den reduzierten Stoffeintrag wäre somit eine Schonung der Umwelt möglich. Den benötigten Strom für die Steuerung der Tröpfchenbewässerung und der Pumpen und deren Betrieb würde die APV-Anlage direkt bereitstellen können (Hörnle, et al., 2021).

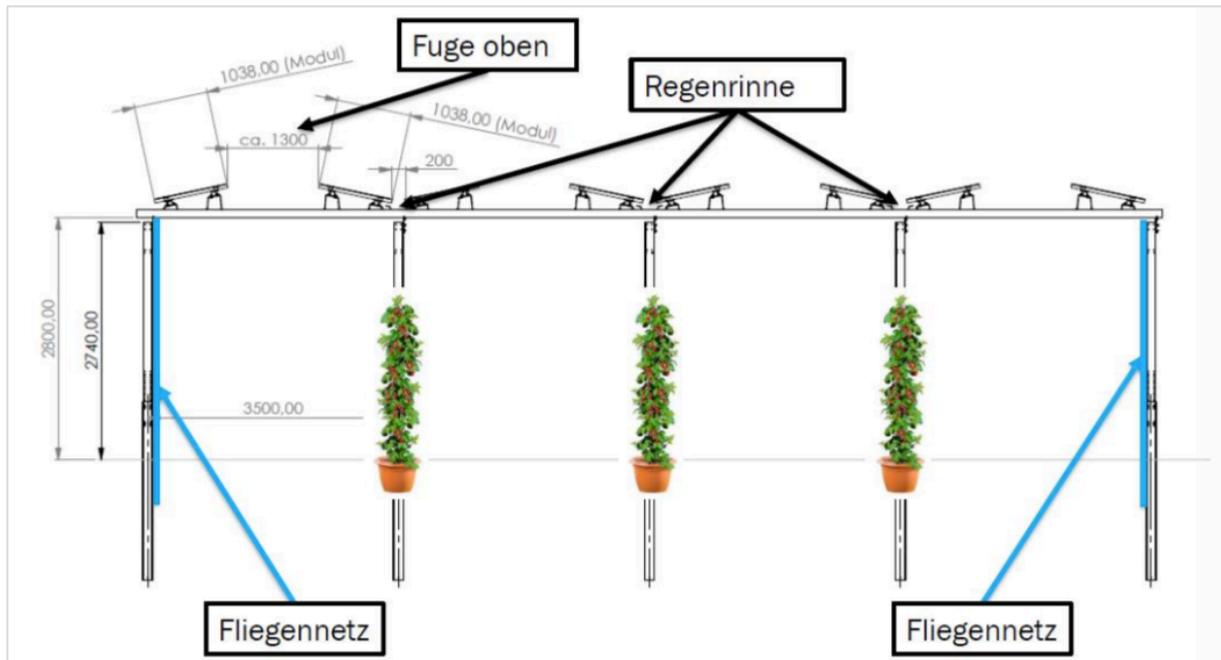


Abbildung 37: Variation eines Bewässerungssystems von APV-Anlagen (Hörnle, et al., 2021).

3.5 Eingliederung und Standortwahl

3.5.1 Anordnung

Nicht nur für die Sammlung von Regenwasser, sondern auch für eine optimale Integration von PV in die Landwirtschaft spielt vor allem die **Anordnung der Komponenten** eine ausschlaggebende Rolle. Werden bspw. Standardmodule verwendet, ist ein größerer Abstand nötig, um eine ausreichende Lichtversorgung der Pflanzen zu gewährleisten. Wird der **Abstand zwischen den Modulen bzw. zwischen den Modulreihen** größer, so bietet die APV-Anlage allerdings keinen Schutz für alle darunter befindlichen Kulturen. Daher sollte *projektspezifisch* ermittelt werden, welche Anordnung der Module geeignet erscheint. Die Verwendung von Glas-Glas-Modulen bietet die Möglichkeit den **Anteil an Glas** zu erhöhen, um somit eine größere, transparente Fläche zu schaffen, welche die Kulturen schützt, aber nicht zu stark verschattet. Dies wird u.a. in der Forschungsanlage APV-Obstbau in Gelsdorf, Rheinland-Pfalz (s. Kapitel 7.5) untersucht. Hier wurden Module unterschiedlich angeordnet, um die Auswirkungen auf die Pflanzenkulturen zu erforschen. In der Anordnung „Zebra“ sind die Solarzellen gleichmäßig in großen Abständen auf der Modulfläche verteilt, in der Anordnung „Block“ sind die Solarzellen in der Mitte des Moduls blockförmig angeordnet, mit großen Bereichen aus Glas an den Seitenrändern (Abbildung 38).

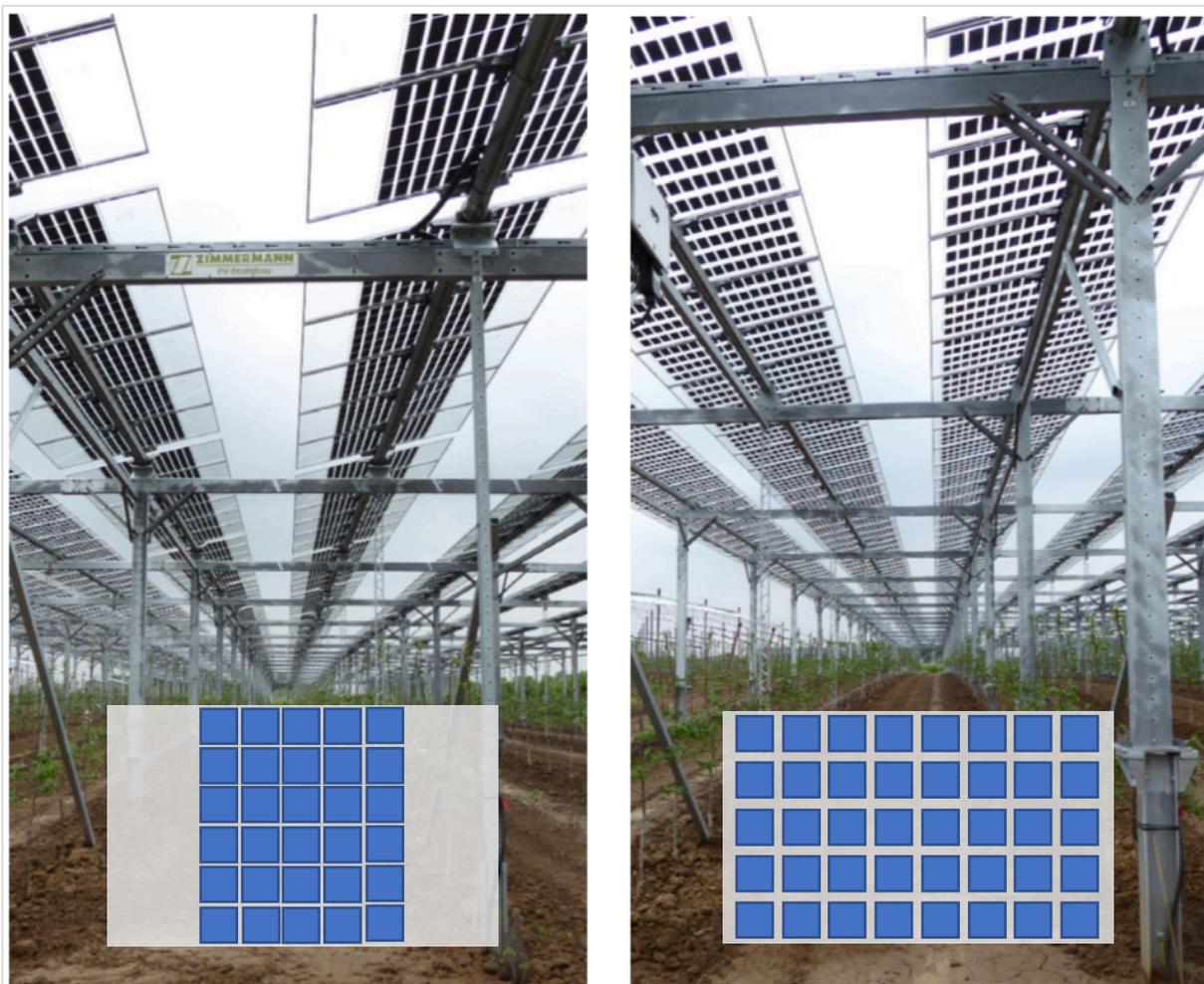


Abbildung 38: Vergleich Anordnung „Block“ (links) und Anordnung „Zebra“ (rechts) [verändert nach Hopf, Fraunhofer ISE (2021)].

3.5.2 Eignungsflächen

Grundsätzlich sind alle Ackerflächen für APV-Anlagen geeignet. Flächen, die einen **natürlichen Sichtschutz** bieten, wie bspw. Waldränder oder abgelegene Flächen in Tälern oder auf Kuppen stellen aus ästhetischer Sicht eine gute Option dar. Hierbei sollten jedoch der Netzanschluss und die Verbrauchernähe beachtet werden. Thüringen weist großflächige Regionen im Ackerbau auf. Hier wäre die Installation großer Systemanlagen sinnvoll. Vor allem im **Thüringer Becken** befinden sich viele ebene, gut geeignete Landwirtschaftsflächen. Eine Umrandung mit Gehölzstreifen kann die Sichtbarkeit der Anlagen reduzieren (s. Kapitel 3.5.3). Die in Thüringen auftretende, in manchen Gebieten geringere Höhe der Sonneneinstrahlung könnte durch Skaleneffekte, die große Anlagen mit sich bringen, wirtschaftlich kompensiert werden.

3.5.3 Landschaftsbild

Die Integration in das **Landschaftsbild** könnte je nach Standort bei den hoch-aufgeständerten Anlagen eher eine Herausforderung darstellen. Eine Umrandungsbepflanzung kann in einer Agrarlandschaft jedoch auch positive Effekte haben. Das derzeitige „konventionelle“ Design

von PV-FFA-Anlagen zielt aktuell auf die Maximierung der Energieerzeugung ab. Ein **integrativer Gestaltungsansatz** würde jedoch eine Eingliederung in das Landschaftsbild optimieren. Hierzu zählen bspw. die Strukturen der Landschaft (Linien, Punkte, Wellen, etc.) in der Anlage widerzuspiegeln oder Sichtschutzhecken zu pflanzen, welche sich in das Landschaftsbild eingliedern und die APV-Anlage verdecken (Abbildung 39). Damit können Anlagen in Verbindung mit Gehölzstreifen in ausgeräumten Agrarlandschaften auch eine positive, strukturgebende Wirkung auf das Landschaftsbild erzielen (s. Kapitel 4.13.1).



Abbildung 39: Integrativer Gestaltungsansatz von APV-Anlagen. (a) Mosaik-Anordnung angepasst an natürliches Landschaftsbild, (b) Bodennahe Anlagen, die der natürlichen Linienstruktur der Landschaft folgen (Scognamiglio, 2015).

Durch schematische **Integrationsmöglichkeiten** werden Anlagen in verschiedenen Mustern angelegt (Abbildung 40): „typische“ PV-Muster (0); Anordnung in parallelen Streifen (1), die Anpassung an natürlich-landwirtschaftliche Muster (2), sowie die Einordnung in Inselflächen (3). Es gilt zu beachten, dass eine individuelle Anpassung an das Landschaftsbild zwar die Akzeptanz steigert, aber auch kostenintensiver ist als standardisierte Anlagen. Es sollten bei Auswahl der Module generell die inzwischen standardisierten Module mit einer Anti-Reflexbeschichtung (s.o.) verwendet werden.

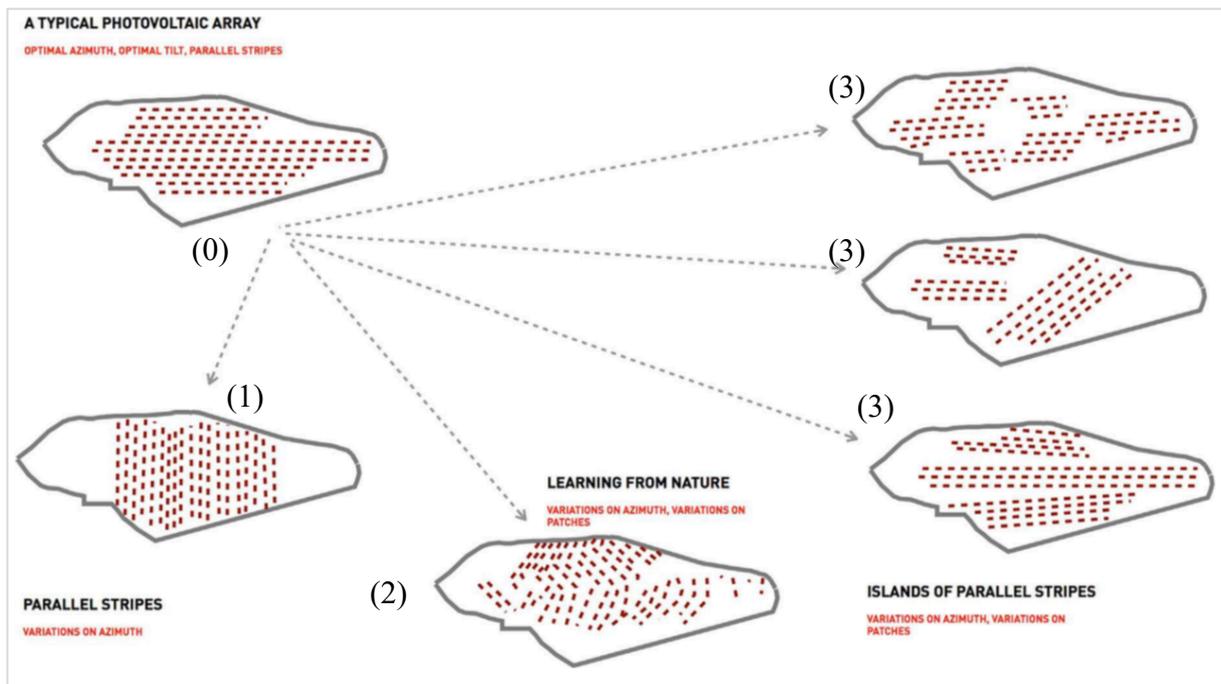


Abbildung 40: Schematische Darstellung verschiedener PV-Muster. (0) konventionell, (1) parallele Streifen, (2) traditionelle Anordnung, (3) Inseln [verändert nach Scognamiglio, (2015)].

3.6 Netzeinspeisung, Eigenverbrauch und Stromerlöse

Neben der Bestimmung geeigneter Flächen ist auch die **Anbindung an das Stromnetz** ein wichtiger Faktor bei der Errichtung einer APV-Anlage. Vor dem Bau der Anlage sollte daher entschieden werden, ob der produzierte Strom eigenverbraucht oder in das anliegende Stromnetz eingespeist wird, wobei **Eigenverbrauch** derzeit am wirtschaftlichsten ist. Bei (gewerblichen) Strombezugskosten in Höhe von ca. 15 ct/kWh (Grave, et al., 2015) ließen sich bei Stromgestehungskosten zwischen 6 ct/kWh und 8 ct/kWh (s. Kapitel 8) Einsparungen von 7 ct/kWh bis 9 ct/kWh erwirtschaften. Bei Eigenverbrauch ist die Nähe des Verbrauchers zur Anlage wichtig. Außerdem sollte der Verbraucher ein dem **Erzeugungsprofil** ähnliches **Lastprofil** aufweisen. D.h. dass besonders im Sommer hohe Energiemengen benötigt werden, und je nach Ausrichtung der Anlage zur Mittagszeit (Süd-Ausrichtung) oder in den Vormittags- und Nachmittagsstunden (Ost-West-Ausrichtung). Bei Verwendung eines Tracking-Systems sollten die Komponenten auf den voraussichtlichen Energiebedarf - je nach Pflanzenbedarf - eingestellt sein.

Die **Sektorenkopplung** kann den Eigenverbrauch erhöhen. Nach Birth (2020) wird die Speicherung von Energie durch Wandlung von Strom in Wärme, Kälte, Gas oder synthetische Kraftstoffe sowie chemische Produkte zum fundamentalen Bestandteil der modernen Energiewirtschaft. Weiterhin kann die Ergänzung durch **Speichersysteme** den Anteil an Eigenverbrauch erhöhen. Eine weitere Option vor allem in der Landwirtschaft stellt das Laden von elektrisch betriebenen Fahrzeugen oder Arbeitsgeräten dar. Dies wird in Zukunft eine

zunehmende Rolle spielen, da das **autonome Fahren** und die **Robotik** in der Landwirtschaft zunehmend Verwendung finden. Die Flächen können somit effizienter bearbeitet werden und durch intelligentes Lademanagement bspw. die Mittagsspitzen der Stromerzeugung optimal genutzt werden.

Die Hofgemeinschaft der Forschungsanlage Heggelbach konnte ihren Strombedarf im Jahr 2017 fast vollständig durch die APV-Anlage decken. Die Anteile der eingespeisten und eigenverbrauchten Energiemengen sind in Abbildung 41 dargestellt.

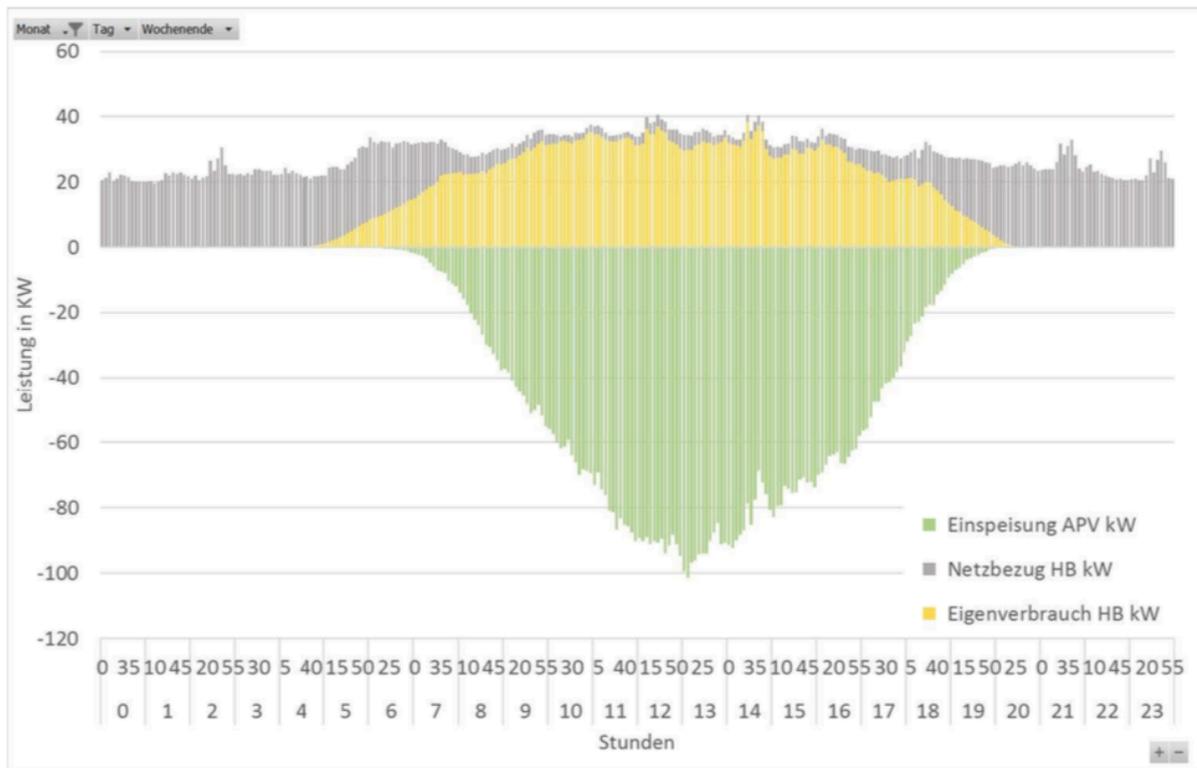


Abbildung 41: Vergleich Einspeisung, Erzeugung und Eigenverbrauch der Hofgemeinschaft der Forschungsanlage Heggelbach (©BayWa r.e. Trommsdorff et al., 2020).

Bei Netzeinspeisung ist die Wirtschaftlichkeit von der Höhe der Vergütung abhängig. Hierbei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten: EEG, Power Purchase Agreements (PPA), Direktvermarktung oder sog. Clouds (s. Kapitel 8).

Ein wichtiger Kostenfaktor von APV-Anlagen mit Netzeinspeisung ist die Nähe zu sog. **Netzknotenpunkten**. Mit steigender Entfernung nehmen die Kosten erheblich zu. Auch gilt es zu prüfen, ob der Einspeisepunkt für den Anschluss des APV-Kraftwerks ausreichend ist. Eine frühzeitige Abstimmung mit dem zuständigen Netzbetreiber ist unbedingt erforderlich. Ein beispielhaftes Schema für Eigenverbrauch (1), Direktvermarktung (2) und Netzanbindung (3) zeigt Abbildung 42.



Abbildung 42: Nutzungsmöglichkeit des Stroms einer APV-Anlage: (1) Technischer Eigenverbrauch (mit Speicher), (2) Direktvermarktung an naheliegende Wohnsiedlung, (3) Energieeinspeisung ins Stromnetz (Trommsdorff et al., 2020).

3.7 Fazit

Die Technik der APV-Anlagen bietet zahlreiche Möglichkeiten der Anpassung an die optimale Nutzung für die Landwirtschaft und die Energiegewinnung. Dies betrifft sowohl inzwischen schon standardisierte wie auch innovative Formen der Aufständerung, der Modultechnik als auch das Anlagendesign, im integrierten System und in der Landschaft. Eine Übersicht über verschiedene Systemtechniken gibt Tabelle 1.

	Technik	Funktion	Kosten [€/kWp]	Besonderheit / Vorteile / innovativer Gehalt	In Anwendung	Landwirtschaft dienende Funktion							
						Schutz vor Hagel	Schutz vor Schnee	Schutz vor Spätfrost	Schutz vor Starkregen	Schutz vor Sonnenbrand	Weniger Krankheiten	Verbessertes Mikroklima	Windfang
				<ul style="list-style-type: none"> Nachführung des Systems ermöglicht 30-45 % höhere Stromerträge möglich Max. Flächenverlust von ca. 15 % 									
Module	Semitransparenz	Lichteinfall	500	<ul style="list-style-type: none"> Hoher Lichteinfall 	✓								
	Bifazial	Stromproduktion	250	<ul style="list-style-type: none"> Höherer Stromertrag auf gleicher Fläche / Ost-West-Ausrichtung möglich (Vormittag/Nachmittag) Auf Massenmarkt verfügbar 	✓								
	Leichtbau	Aufhängung	350	Weniger massive Unterkonstruktion nötig	✓								
	Organische	Wellenabsorption	-	Absorption / Passage bestimmter Wellenlängen									
	Farbigkeit	Landschaftsbild	-	Integration in Landschaftsbild									

Einige Ansätze wie Faltmodule oder Dome-Anlagen befinden sich noch im Forschungs- und Entwicklungsstatus, in der Erprobung bzw. es ist ein Praxistest zeitnah geplant. Weiterführende Informationen finden sich in Kapitel 3.

4 Naturverträglichkeit, Mikroklima, Ressourcen

Im Folgenden werden Ergebnisse aus **wissenschaftlichen Untersuchungen** und Studien zur Naturverträglichkeit von PV-FFA und von APV und ihr Einfluss auf Ressourcen und Mikroklima kritisch betrachtet.

Bisher wird in Leitlinien zu genehmigungsrechtlichen Rahmenbedingungen für APV-Anlagen von PV-FFA und deren möglichen Auswirkungen in Bezug auf Schutzgüter und andere Naturschutzbelange, auf mögliche Restriktionsfaktoren und auf die Raumplanung ausgegangen. Vielfach wird dabei auf zum Teil **veraltete Studien und Leitlinien** zurückgegriffen, die dem Standard von derzeit üblichen PV-FFA nicht mehr entsprechen, die oft aus ‚grauer Literatur‘ stammen und zumeist kaum wissenschaftlich fundiert sind (d.h. nicht aus referierten Veröffentlichungen in Fachjournalen). Zahlreiche, neue Ergebnisse zur Naturverträglichkeit von PV-FFA finden dabei keine Berücksichtigung. Teils werden auch subjektive Einschätzungen vorgenommen und nur auf PV-FFA bezogene Informationen zur Beurteilung von APV-Anlagen herangezogen. Dabei wird verkannt, dass **APV** sich **ausschließlich** auf **landwirtschaftliche Flächen** bezieht und als Referenzfläche zur Beurteilung der Auswirkungen der APV nur eine Acker- oder Grünlandfläche in der entsprechenden Region bzw. auch in ggf. dem entsprechenden Schutzgebiet herangezogen werden sollte. Diese bestehenden Ackerflächen sind bereits in Bezug auf zahlreiche Schutzgüter wie Biodiversität, Boden, positives Landschaftsbild, etc. durch die zumeist konventionelle Bewirtschaftung der Flächen problematisch und werden aus Naturschutzsicht generell als nicht schützenswert eingestuft. **APV-Anlagen würden in fast allen Fällen zu einer Verbesserung der Schutzgüter führen**, wie die folgenden, neuen, wissenschaftlichen Untersuchungen zeigen, und diese nicht einschränken, wie es bei Anwendung der bisherigen Kriterienkataloge für PV-FFA suggeriert wird. Damit herrschen für die Beurteilung und Genehmigung von **APV-Anlagen grundlegend anderen Bedingungen als für PV-FFA**. Durch Standardisierung und die Einhaltung einer ‚guten fachlichen Praxis‘, wie in der Landwirtschaft üblich, ergänzt durch zu erstellende Leitlinien für eine ‚gute Agri-Photovoltaik-Praxis‘, ggf. als Auflage für den Bau von APV-Anlagen zu verwenden, sollten letztendlich **keine zusätzlichen Umweltprüfverfahren** notwendig sein. Dies soll auch Landwirt*innen ermöglichen, APV-Anlagen kleineren Maßstabs auf von ihnen ausgewählten Äckern bzw. über Anbaukulturen zu etablieren, ohne die Notwendigkeit zur Erstellung aufwändiger, **nicht notwendiger, kostspieliger Gutachten und Einzelfallprüfungen**. Auch eine Standortgebundenheit wäre damit durch die Auswahl der Fläche und Anbaukultur durch die Landwirt*innen gegeben. Bei zukünftig zu erwartenden, auch nicht-ortsgebundenen Anlagen sind dann die Leitlinien für den jeweiligen Standort der Kultur anzuwenden.

Für die dringend benötigten **Anpassungen und Vereinfachungen von Regelungen und Rahmenbedingungen** sollte deshalb sorgfältig auf Grundlage wissenschaftlicher

Publikationen geprüft werden, ob die zugrundeliegenden Kriterien für APV zutreffend und wissenschaftlich belastbar sind. Die im Kriterienkatalog des Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende (KNE, 2021) aufgeführten Flächentypen und Kategorien von **Faktoren** (Schutzgütern) beispielsweise sind nicht auf APV-Anlagen ausgerichtet und daher generell nicht zutreffend und **für Ackerflächen nicht anwendbar** (s.u.). Zudem sollten jetzt schon absehbare, neue Entwicklungen und Kommerzialisierungen im Bereich der Aufständerung und Modultechnik, die großen Einfluss auf mögliche Auswirkungen der Systeme haben - generell ist von einer weiteren Verringerung von Umweltauswirkungen auszugehen -, berücksichtigt und neue Regelungen nicht zu eng formuliert werden.

Die Informationen und Stellungnahmen in diesem Kapitel sollen einer realistischen Einordnung von APV dienen, dem Gesetzgeber Hinweise für **nicht-notwendige Restriktionen und zur Standardisierung und Vereinfachung von Genehmigungsverfahren** von PV-Anlagen auf Ackerflächen geben, und Kommunen bei der Genehmigung von APV-Anlagen unterstützen.

In einem Vergleich der Umweltauswirkungen von **PV-FFA** auf verschiedenen Ebenen mit der **traditionellen Stromerzeugung** erwiesen sich 22 der 32 betrachteten Auswirkungen als positiv, 4 als neutral und 6 erfordern gemäß der Autor*innen weitere Untersuchungen (Turney & Fthenakis, 2011). Keine der Auswirkungen erwies sich als negativ. Im Vergleich mit einer mit traditionellen Kraftwerken assoziierten Mortalität von Tieren beispielsweise, oder einem auf andere Ursachen zurückführbaren Tiertod, beispielsweise Kollisionen mit Gebäuden, verkehrsbedingte Mortalität oder Habitat-Verlust in Zusammenhang mit fossiler Energiegewinnung, wird eine Mortalität in Bezug zu **Solarparks** für **sehr viel geringer** gehalten (Walston, et al., 2016). Möglichkeiten, negative Einflüsse von Modulen durch neue Technologien und Designs zu minimieren, sind vorhanden (s.u.) (Smith et al., 2022).

4.1 Ackerfläche und Schutzgüter

Im Folgenden wird auf den Zustand von Ackerflächen in Bezug auf Schutzgüter eingegangen, die für die Beurteilung einer APV-Anlage Bedeutung haben könnten (Ekardt et al., 2008). Es besteht eine Privilegierung der Landwirtschaft in unterschiedlichsten Bereichen des Umweltrechts, wie

- **Besondere Bedeutung der Landwirtschaft nach § 5 Abs. 1 BNatSchG**
- Die Bedeutung der „natur- und landschaftsverträglichen“ Land-, Forst- und Fischereiwirtschaft ist zu berücksichtigen; zugrunde liegt eine den Kriterien der ‚guten fachlichen Praxis‘ in § 5 Abs. 4-6 BNatSchG entsprechende Landwirtschaft
- Landwirtschaft, Schutzgebiete und FFH-Verträglichkeitsprüfung
- Auch für den naturschutzrechtlichen Gebietsschutz ergeben sich Spezifika für die Landwirtschaft, und § 26 Abs. 2 BNatSchG bestätigt die Anwendbarkeit der allgemeinen **Landwirtschaftsklausel in Landschaftsschutzgebieten**. Hieraus ist die Geltung

dieser Klausel in anderen Schutzgebietskategorien abzuleiten, wobei die Bedeutung in den einzelnen Schutzgebietskategorien unterschiedlich ist

- **Privilegierung** der Landwirtschaft im Bodenschutz- und Wasserrecht
- Im § 3 BBodSchG und im DüngemG ist die landwirtschaftliche Nutzung privilegiert, wobei ein nachhaltig die Bodenfunktionen schützender oder wiederherstellender, also mit § 1 BBodSchG in Einklang zu bringender Ansatz nicht priorisiert ist
- **Privilegierung der Landwirtschaft im Naturschutzrecht ist dargestellt in § 18 Abs. 2BNatSchG.**

Nach § 14 Absatz 2 Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG) ist die landwirtschaftliche Bodennutzung nicht als Eingriff anzusehen, soweit dabei die Ziele des Naturschutzes und der Landschaftspflege berücksichtigt werden. Entspricht die landwirtschaftliche Bodennutzung den sich aus dem Recht der Landwirtschaft ergebenden Anforderungen an die ‚gute fachliche Praxis‘, kollidiert sie in der Regel nicht mit den Zielen des Naturschutzes und der Landschaftspflege.

Zur ‚guten fachlichen Praxis‘ hat die Bundesregierung Grundsätze und Handlungsempfehlungen veröffentlicht (BMEL, 1999).

4.2 Boden, Wasser, Erosion, Biodiversität

Durch die landwirtschaftliche Bearbeitung kommt es regelmäßig zu Bodenverdichtungen, Bodenumlagerungen und Veränderungen der oberen Bodenschicht (pflügen, grubbern etc.). Diese Kulturmaßnahmen des Landwirts zählen zur ‚guten fachlichen Praxis‘ und sind einerseits gewünscht und notwendig zur Unkrautbekämpfung und zum Vorbereiten des Ackers für den Anbau der Kulturen, oder kaum vermeidbar, wie Bodenverdichtungen. Letztere fördern Bodenerosion bei Starkregen, Nährstoff- und Pflanzenschutzmitteleintrag in Gewässer und Abtrag der fruchtbaren Bodenschicht. In Thüringen sind nahezu alle Gebiete schadverdichtungsgefährdet (Abbildung 43). Versiegelungen der Fläche durch Rüben- oder Strohlager, Geräteschuppen und Ähnliches mit eingeschränkter Größe auf landwirtschaftlichen Flächen bedürfen keiner Baugenehmigung.

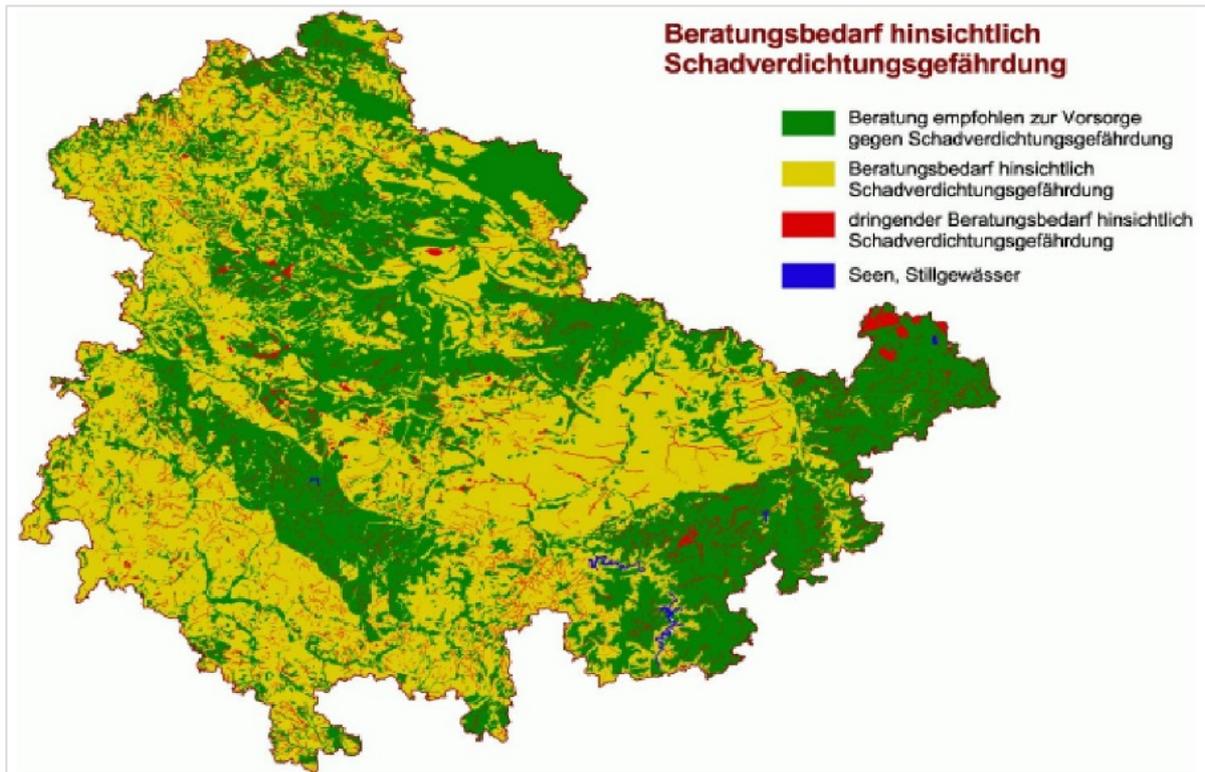


Abbildung 43: Einteilung des Gesamtgebiets in 3 Gefährdungsklassen hinsichtlich der Schadverdichtungsgefährdung des Bodens in Thüringen (Thüringer Klimaagentur 2019).

Wie oben bereits aufgezeigt, gilt die intensivisierte Landwirtschaft als eine wesentliche Ursache für den Rückgang der **biologischen Vielfalt**. Durch die Energiepflanzenproduktion hat der Druck auf Naturräume noch stark zugenommen. Dies betrifft nicht nur Insekten und Vögel, sondern auch Säuger wie den Feldhamster, der seine größten Vorkommensgebiete in Mitteldeutschland hat. Heute ist die größte Bedrohung für den Feldhamster die Intensivierung der Landwirtschaft. Auf großen, monotonen Feldern fehlt es dem Feldhamster an Verstecken und an Stellen, wo er seine Baue graben kann (NABU, o. J.). Auch haben die Bestände des Feldhasen seit den 80er Jahren um 75 Prozent abgenommen, da die intensive Landwirtschaft mit strukturarmen und eintönigen Feldern dem Feldhasen zu wenig Schutz und Nahrung bietet (NABU, o. J. a).

Nach Einschätzung von Naturschutzorganisationen sind Ackerflächen mit langjähriger, intensiver Nutzung in eingeschränkten Fruchtfolgen mit Reinkulturen oder Flächen, die bereits von den Folgen der Klimakrise betroffen sind (sogenannte „Klimawandel-Schadflächen“), besonders für die Nutzung von PV-FFA geeignet (WWF, 2021). Auch KNE (2021) stuft Flächen ohne besondere landschaftliche Eigenart, wie Ackerflächen oder Intensivgrünland, intensiv genutzte Äcker ohne Saum- und Sonderstrukturen sowie benachteiligte Gebiete oder unwirtschaftliche Ackerflächen als ‚in der Regel geeignet‘ für PV-Anlagen ein, ebenso wie Standorte mit landschaftsästhetisch vorbelasteter Landschaft, z.B. Verkehrswege, Konversionsflächen und Ortsränder.

4.3 Schutzkonstruktionen

Kulturschutzeinrichtungen ermöglichen Landwirt*innen vorrangig den zuverlässigen Schutz ihrer Kulturen wie Obstanlagen vor Hagel, Frost und Starkregen. Darüber hinaus können sie Obstkulturen vor Sonnenbrand, Schadinsekten und Vögeln schützen (Dierend, 2009). Für Obstbaumanlagen gibt es verschiedene Überdachungssysteme: Hagelschutznetz, Folienüberdachung oder eine Folien-Netz-Kombination (Dierend, 2009). ‚Bauten mit einer Hilfsfunktion‘ wie **Hagelschutznetze gehören nach heutigem Stand zur ‚guten fachlichen Praxis‘ des Obstbaus**. Sie sind sowohl fachlich geeignet als auch nachweislich wirksam, um o.g. Schäden zu vermeiden. Hagelschutzanlagen bestehen aus in den Boden gerammten, mit Sicherungsseilen fixierten und Drähten verbundenen Betonträgern, auf die das Hagelschutznetz aufgespannt wird. Die bis zu 4 Meter hohen Installationen werden normalerweise für zwei Baumgenerationen (30 Jahre) in Betrieb genommen. Die Netze müssen regelmäßig gewechselt werden. Hagelschutznetze außerhalb von Schutzgebieten und Naturschutzgebieten entsprechen der ‚guten fachlichen Praxis‘ und widersprechen nicht den Zielen des Naturschutzes und der Landschaftspflege, sodass eine **naturschutzrechtliche Genehmigung** nach § 17 Absatz 3 BNatSchG nicht erforderlich ist und Investitions- und Rechtssicherheit besteht.

Ein Einfluss von Kulturschutzeinrichtungen auf Greifvögel konnte nicht nachgewiesen werden, die überdachten Flächen wurden genauso oft frequentiert wie die Kontrollflächen (Stahmer, 2018). Greifvögel überflogen innerhalb ihrer großen Aktionsräume auch die überdachten Obstkulturen zur Nahrungssuche und wurden weiterhin bei der Ansitzjagd am Rand der Versuchsfelder gesichtet. Zudem wurde der Turmfalke beim Ansitzen unter der Folien-Netz-Überdachung einer Kirschkultur sowie dort beim Fressen auf dieser Überdachung sitzend beobachtet. Die Gesamtabundanz der Insektivoren-Gilde blieb in beiden untersuchten Obstkulturen von Kulturschutzeinrichtungen unbeeinflusst. Kulturschutzeinrichtungen zeigten ebenfalls keinen Einfluss auf die Arthropoden-Trockenbiomasse. In Thüringen sind Hagelschutznetze nicht genehmigungspflichtig.

4.4 Ackerfläche und APV

Nach der Definition einer **der Landwirtschaft dienenden Funktion** sind Bewirtschaftungskonzepte deshalb zonenkonform, weil auf der Fläche Kulturen angebaut und Tiere gehalten werden, die zwingend auf eine bauliche Hilfs- und Schutzkonstruktion angewiesen sind, oder die sich **potenziell mindernd auf bestehende Umweltdefizite (inkl. Klimaveränderungen)** im Perimeter der Parzelle auswirken. Ebenso wie Hagelschutznetze, Spargelfolien oder Installationen zum Sonnen- und Regenschutz haben auch **APV-Anlagen eine Hilfs- und Schutzfunktion**. Derzeit werden bereits PV-aktive Folien getestet und Netze entwickelt (s. Kapitel 3.2.4), von denen erwartet wird, dass sie in naher Zukunft in der landwirtschaftlichen Praxis genutzt werden können.

Wie in dieser Studie aufgezeigt wird, verbessern APV-Systeme nicht nur das Mikroklima auf dem Acker, sondern dienen neben dem Schutz der Kulturpflanze und einer Stabilisierung des Ertrages unter Stressbedingungen auch dem **Bodenschutz**, der Optimierung des **Wassermanagements** und der **Biodiversität (Ökosystemleistungen)**. Dies trifft sowohl auf landwirtschaftliche Flächen mit geringem Ertragspotential zu wie auch auf Flächen an **Hochertragsstandorten**, die ebenso in den letzten Jahren starke, klimabedingte Ertragsverluste einführen. Diese Ausführungen unterstützen, dass **der Landwirtschaft dienende Konstruktionen auf Ackerflächen erlaubt sind und in Schutzgebieten nicht unter die Flächen mit fachrechtlicher Ausschlusswirkung fallen**. Dies sollte ebenso für APV-Anlagen gelten. In Thüringen liegen hohe Anteile der landwirtschaftlichen **Flächen in Schutzgebieten** verschiedener Kategorien. Ackerflächen und Sonderkulturen (Hopfen, Gartenbau, Baumschule, Rebfläche, Obstplantagen), die 40,5 % bzw. 656.842 ha der Landesfläche ausmachen, finden sich in Naturschutzgebieten 0,21 % (1.379 ha), in Biosphärenreservaten der Kategorie I und II 0,0 %, III 1,5 % (9.787 ha), im Landschaftsschutzgebiet 10,1 % (66.472 ha), im Naturpark 11,7 % (76.719 ha), in FFH und EU-Vogelschutzgebieten 7,3 % (48.869 ha), Wasserschutzgebieten Zone II 1,5 % (9.524 ha), Wasserschutzgebieten Zone III 12,9 % (84.667 ha) und in benachteiligten Gebieten 37,2 % (244.477 ha) (Abbildung 44).

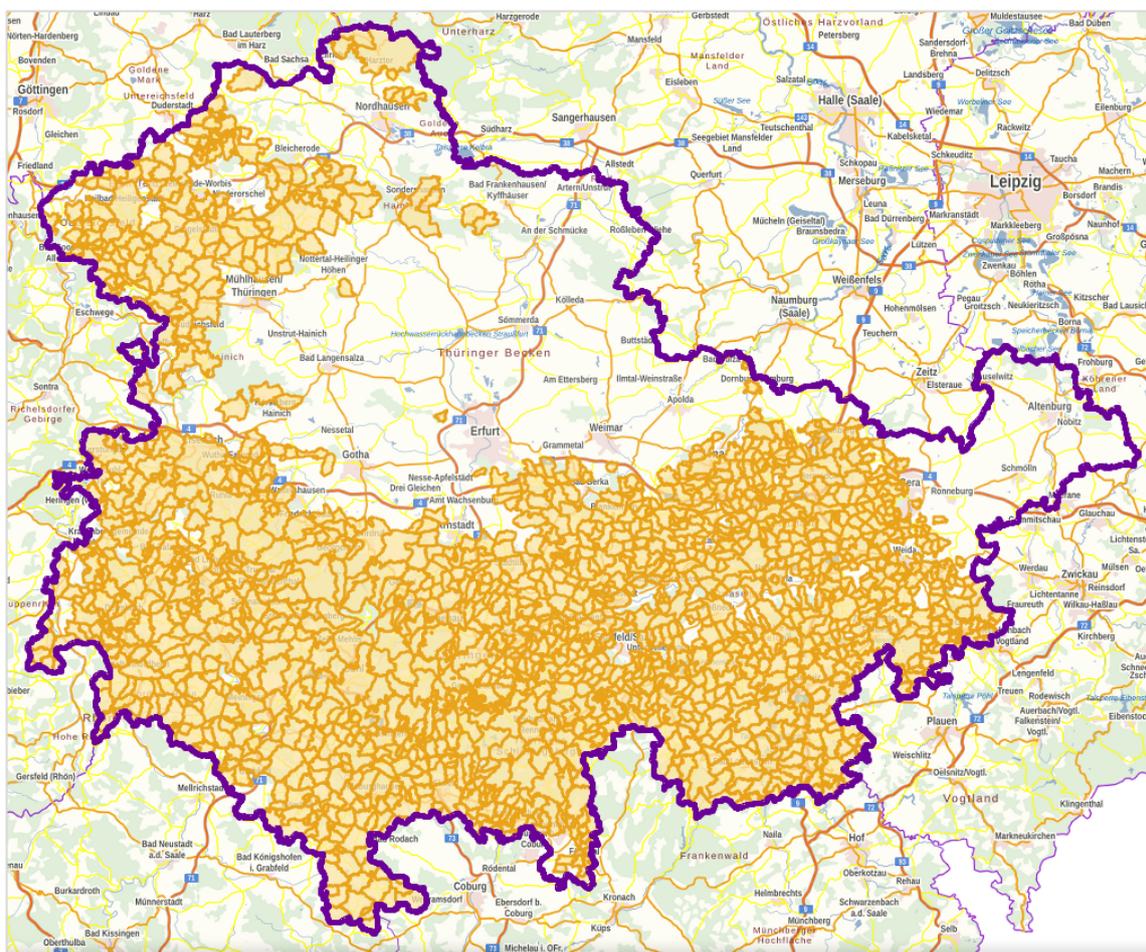


Abbildung 44: „Benachteiligte Gebiete“ in Thüringen © GDI-Th (TMIL, 2022).

Der Begriff ‚**benachteiligte Gebiete**‘ ist im **EU-Landwirtschaftsrecht** die Basis für »Zahlungen wegen naturbedingter Benachteiligungen in Berggebieten und in anderen benachteiligten Gebieten zur dauerhaften Nutzung landwirtschaftlicher Flächen und damit zur Erhaltung des ländlichen Lebensraums sowie zur Erhaltung und Förderung von nachhaltigen Bewirtschaftungsformen«. Hierzu gehören Berggebiete und Gebiete, in welchen die Aufgabe der Landnutzung droht und der ländliche Lebensraum erhalten werden muss. Diese Gebiete haben folgende Nachteile:

- schwach ertragfähige landwirtschaftliche Flächen
- als Folge geringer natürlicher Ertragfähigkeit deutlich unterdurchschnittliche Produktionsergebnisse
- eine geringe oder abnehmende Bevölkerungsdichte, wobei die Bevölkerung überwiegend auf die Landwirtschaft angewiesen ist (Clearingstelle, o. J.).

Die Bundesländer Baden-Württemberg, Hessen, Rheinland-Pfalz, Sachsen, das Saarland und Niedersachsen haben die Länderöffnungsklausel des EEG genutzt: In § 37c Abs. 2 enthält das EEG 2017 für Anlagen von mehr als 750 kW eine sog. Länderöffnungsklausel, die es den Bundesländern ermöglicht, **per Rechtsverordnung in benachteiligten Gebieten auch Acker- oder Grünflächen für den Bau von PV-FFA** zuzulassen. Im neuen Klimaschutzpaket ist eine Erweiterung der Definition der benachteiligten Gebiete geplant, die die Fläche bundesweit um 9 % erhöht. Wie oben bereits aufgeführt, unterstützen die Ministerien ‚Wirtschaft und Klimaschutz‘, ‚Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz‘ und ‚Ernährung und Landwirtschaft‘ den Ausbau der APV. Intensiv bewirtschaftete, landwirtschaftliche Flächen werden aus offensichtlichen Gründen, wie oben aufgeführt, als aus Naturschutzsicht nicht schützenswert angesehen. Im Folgenden werden Auswirkungen durch PV-FFA auf Umwelt und Schutzgüter betrachtet.

4.5 Wirkung PV-FFA auf Schutzgüter – Übertragungsmöglichkeit auf APV

Aufgrund zahlreicher Veröffentlichungen zur Auswirkung von PV-FFA auf Schutzgüter wie Boden, Wasser und Biodiversität, die im Folgenden übersichtsartig dargestellt werden, kommen **Natur- und Umweltschutzorganisationen** (DNR, DUH, WWF, Germanwatch, Greenpeace) im November 2021 zur Einschätzung (März & Schünemann, 2021):

„**Solar-Freiflächenanlagen leisten bei guter Umsetzung einen wichtigen Beitrag zum Natur- und Artenschutz.** Diese gute Umsetzung möchten wir zum Standard machen. Wir fordern die zukünftige Bundesregierung daher auf, ein Solarenergiegesetz auf den Weg zu bringen, in dem verbindliche umweltfachliche Mindestkriterien für Planung, Bau und Betrieb festgelegt werden. Der Ausbau der Solarenergie muss zu einem **Win-Win für den Klima- und Naturschutz** werden“. **Solarparks** können so konzipiert werden, dass sie Biodiversität und

Bodenschutz verbessern, während sie eine zusätzliche Einkommensquelle schaffen. Dies bestätigen Nordberg et al. (2021) in einem Review zum Design von Solarparks.

Für die Standortauswahl von PV-FFA fordern die Umweltorganisationen einen bundesweiten Kriterienkatalog, der als Orientierungshilfe für Länder und Kommunen dient. Darin sollen Ausschlussgebiete wie z.B. Naturschutzgebiete, Waldflächen und exponierte Standorte sowie besonders geeignete Standorte für PV-FFA definiert werden. Hierzu zählen aus Sicht der Umweltorganisationen vorrangig auch versiegelte Flächen und intensiv bewirtschaftete landwirtschaftliche Flächen auf Niedrigertragsstandorten. Auf Ackerflächen soll biodiversitätsfördernde APV vorangetrieben werden (s.u.).

Die **Naturschutzorganisationen** konstatieren, dass PV-FFA u.a. „zur Extensivierung der Landwirtschaft beitragen und somit die **Biodiversität in der Agrarlandschaft** erhöhen können. Auf Flächen, die vorher intensiv als Ackerland genutzt wurden, ist durch den Bau von Freiflächenanlagen bei ausreichender Besonnung zwischen den Reihen meist von einer Verbesserung für Natur und Umwelt auszugehen, u.a. durch einen verbindlich zu regelnden Wegfall von Pestizid- und Düngemittleinsatz und der Beruhigung der eingezäunten Flächen. Ertragsarme Agrarflächen, auf denen regelmäßig Energiepflanzen wie Mais und Getreide in Monokultur angebaut werden, wären künftig für Solar-Freiflächenanlagen mit **hohem Mehrwert für den Arten- und Naturschutz** nutzbar. Der Stromertrag pro Fläche liegt bei Photovoltaik-Freiflächenanlagen um ein Vielfaches höher als der von Biomasse zur energetischen Nutzung. Gleichzeitig entsteht mehr **Lebensraum für Pflanzen und Tiere als die Anbauflächen in Monokultur bieten können**“ (März & Schünemann, 2021).

Für PV-FFA schlagen sie neben versiegelten Flächen, Konversionsflächen, Deponien, Flächen entlang von Verkehrsinfrastrukturen, landwirtschaftliche Flächen, vorrangig Niedrigertragsstandorte, die zuvor intensiv bewirtschaftet wurden, vor. Nach besonderer Abwägung/Einzelfallprüfung sollen laut des o.g. **Forderungspapieres Landschaftsschutzgebiete** (z.B. intensiv genutzte Ackerflächen innerhalb der Schutzgebiete), **Vogelschutzgebiete** (Verträglichkeitsprüfung erforderlich, z.B. intensiv genutzte Ackerflächen innerhalb der Schutzgebiete), Entwicklungszonen der **Biosphärenreservate**, ökologische **Korridore/Wildtierkorridore**, **Renaturierungsflächen**, **unzerschnittene störungsarme Räume**, **Tagebaurestseen**, **künstliche Gewässer** (Floating-PV) und **Moorflächen**, sofern eine gleichzeitige Wiedervernässung berücksichtigt wird, für **PV-FFA geeignet** sein. Inwieweit und mit welchen Details Einzelfallprüfungen notwendig sind, sollte aus den **neuen wissenschaftlichen Untersuchungen** abgeleitet und möglichst generalisiert werden.

Schon im Jahr 2009 konstatieren Herden et al., dass bei PV-FFA-Planungen auf Intensivackerflächen nach den derzeitigen Bewertungsstandards die positiven Auswirkungen auf den Arten- und Biotopschutz (und auch auf abiotische Schutzgüter wie Boden, Wasser und Klima) überwiegen können (Herden et al., 2006). Ein **Kompensationsbedarf** für vorhabensbedingte

„erhebliche Beeinträchtigungen des Naturhaushaltes“ ist in solchen Fällen aus Sicht des Naturhaushalts **kaum zu begründen**. Hier wird von einer Überführung in extensive Grünlandnutzung ausgegangen, die zu einer deutlichen Aufwertung der Lebensraumfunktion für viele Tier- und Pflanzenarten führt; bei diesen Anlagen würden die geringfügigen Versiegelungen vermutlich mehr als kompensiert. Sie sollten, bei gutem Biodiversitätskonzept, sogar selbst als Kompensationsmaßnahme für anderweitige Versiegelung gelten.

4.6 Boden

Wissenschaftliche Untersuchungen zeigen **positive Auswirkungen von PV-FFA auf Bodentemperatur und -feuchtigkeit** (Adeh et al., 2018; Marrou et al., 2013a). Auch in einer britischen PV-FFA wurden während der Vegetationsperiode auf **Grasland kühlere Bodentemperaturen** und **eine höhere Bodenfeuchtigkeit** unter den Paneelen im Vergleich zu den Lücken zwischen den Paneelreihen gemessen (Makaronidou, 2020), oder in der **Anlage in Heggelbach, Baden-Württemberg**, ein «Cooling-Effekt» der Substratoberfläche direkt unter den PV-Paneelen beobachtet (Schindler et al. 2018). Eine Umwandlung von salzigem, sumpfigen Ödland in fruchtbares Land für Gemüseanbau, bedingt durch eine Verbesserung des Bodenlebens, u.a. durch eine gesenkte Evaporationsrate, wird in einer Langzeitstudie aus Indien beschrieben (Chowdhury & Mandal 2021). Durch Etablierung einer Vegetationsdecke aus Gräsern, Sträuchern und Blühpflanzen verbesserte sich die Bodengesundheit, erhöhte sich die **CO₂ Speicherung**, das **Wasserrückhaltevermögen** und die **Infiltration**, **reduzierte der ‚run-off‘** und verringerte sich die **Erosion** in Solarparks (Bartley et al., 2014; Li et al., 2007). Diese Beobachtungen, wenn auf teilweise Verschattung durch Module oder auf zusätzliche Bepflanzung unter den Modulen oder an Anlagenrändern zurückzuführen, könnten auf APV übertragbar sein.

Die Umwandlung von Acker in naturnahe Grünlandvegetation innerhalb von PV-FFA kann gemäß Modellberechnungen zu einer Steigerung des **Kohlenstoffspeicherpotentials um 65 %** führen (Walston, et al., 2021). Allerdings ist dieser Effekt nicht immer zu beobachten (Choi, et al., 2020). Zudem konnten niedrig wachsende Gräser und Leguminosen innerhalb von drei Jahren nach Bau eine umfangreiche neue Pflanzendecke bilden und so der Bodenerosion vorbeugen (Beatty et al., 2017; Uldrijan et al., 2021).

Laut Handlungsleitfaden Freiflächensolaranlagen (2019) ist der **Eingriff in Boden und Grundwasser** mit seinen Funktionen (natürliche Bodenfruchtbarkeit, Ausgleichskörper im Wasserhaushalt, Filter und Puffer für Schadstoffe, Sonderstandort für naturnahe Vegetation) bei PV-FFA **meist gering** (Baden-Württemberg Umweltministerium, 2019). Betriebsbedingte Auswirkungen von PVA-FFA auf den Boden und den Wasserhaushalt werden von Badelt et al. (2020) und Ebert & Müller (2011) im Allgemeinen als **unerheblich** oder **sehr gering** angesehen. Unter Umständen mögliche Kontamination aus Tragekonstruktionen oder defekten Modulen seien vermeidbar (s.u.).

4.7 Wasserhaushalt

Positive Auswirkungen auf den Wasserhaushalt durch verringerte Evapotranspiration unter den Modulen und höhere Infiltration aufgrund der Bepflanzung können ein Anheben des **Grundwasserspiegels** unterstützen (Yapp et al., 2010), aber auch oberflächennahe Austrocknungen sind zeitweise möglich, während aber unter der obersten Bodenschicht Kapillarkräfte des Bodens wieder eine gleichmäßige Feuchteverteilung bewirken (Herden et al., 2009).

Je nach Modulaufbau bei PV-FFA können Starkniederschläge in Randbereichen der PV-Module zu begrenzter Bodenerosion beitragen (Badelt et al., 2020). Abhilfe ist möglich (s. Kapitel 3.4, 4.14.1, 7.2). Bodenverdichtungen können durch Errichtung von Baupisten, Lager- und Abstellflächen und Bodenumlagerungen und -durchmischungen während des Baubetriebs entstehen. Vermeidungsmaßnahmen für die o.g. Faktoren sind möglich (s.u.).

In Bezug auf **Wasserschutzgebiete** können PV-FFA grundsätzlich in der Schutzzone III von Wasserschutzgebieten und Heilquellenschutzgebieten **zugelassen** werden, wenn eine Verunreinigung des Grundwassers oder sonstige nachteilige Veränderungen seiner Beschaffenheit nicht zu besorgen sind (s. §53 WG BW zu §62 WHG; s. auch Merkblatt Nr. 1.2/9 bayerisches Landesamt f. Umwelt). In der **Schutzzone II** von Wasser- und Heilquellenschutzgebieten kann im Einzelfall in Abstimmung mit der zuständigen Wasserbehörde eine Befreiung von den Verboten der jeweiligen Schutzgebietsverordnung möglich sein. Hier ist in besonderem Maße die örtliche Schutzfunktion der Deckschichten zu beachten. Ausschlaggebend wäre hier die Frage, ob die Anlage auf einer vorherigen Ackerfläche errichtet wurde, auf der regelmäßige Bodenbearbeitung erfolgte, da für diesen Fall das Kriterium der **Nichtverletzung der Deckschicht nicht zutrifft**. Auch in festgesetzten **Überschwemmungsgebieten** kann die gemäß § 78 Wasserhaushaltsgesetz (WHG) grundsätzlich verbotene Planung und Errichtung von Solarparks unter den dort geregelten Voraussetzungen als **Ausnahmeentscheidung** zulässig sein. Eine PV-FFA könnte zur **Renaturierung und Wiedervernässung** beitragen und so positiv die regionale Wasserbilanz und die CO₂ Speicherung beeinflussen. Vor treibenden Hindernissen bei Überschwemmungen könnte sie einfach geschützt werden.

4.8 Temperatur/Wärme

Ein **«Cooling-Effekt» der Lufttemperatur** durch Schattenwurf unter den Paneelen und eine **höhere Luftfeuchtigkeit** wurde beobachtet. Diese Effekte vergrößern die mikroklimatische Vielfalt eines Solarparks und erweitern die Habitat-Heterogenität zugunsten von Fauna und Flora (s.u.) (Beatty et al., 2017; Adeg et al., 2018).

In einem semiariden Gebiet in den USA waren die Temperaturen unter einer PV-FFA nachts regelmäßig 3°C bis 4°C höher als in der freien Natur (Barron-Gafford, et al., 2016). Ähnliches wurde in Deutschland beobachtet (Günnewig et al., 2007). Dies könnte **Frostschäden**

vorbeugen, andererseits aber auch einen Effekt auf die Produktion von Kaltluft mit klimatischer Ausgleichsfunktion haben.

Eine mögliche **lokale Wärmeerzeugung** von den Modulen wird als vergleichbar mit einer Oberfläche mit ca. 20 % Albedo eingeschätzt. Zum Vergleich: Asphalt - Albedo von 12 % - 25 %, Beton 14 % – 22 %, eine weiße Mauer 65 % – 80 %, eine graue Mauer 20 % – 45 %, **grünes Gras** 26 % (Umweltschutzamt, o. J.). Die **Wärmespeicherkapazität** ist deutlich geringer im Vergleich bspw. mit einer massiven Betonwand (Wirth, 2022). Die Erwärmung der Module auf im Extrem über 60° C könnte zu Verletzungen oder Tötung von darauf befindlichen Kleintieren führen. Da die Erwärmung zeitverzögert auftritt, ist ein frühzeitiges Erkennen der hohen Temperaturen bei Annäherung anzunehmen, mit nachfolgender Fluchtmöglichkeit. Daher dürfte das Konfliktpotential gering sein.

Der **solare Reflexionsgrad** gewöhnlicher PV-Module ist mit einer Größenordnung von 3 % – 5 % sehr gering, im Vergleich zu einer üblichen Wärmeschutz-Isolierverglasung, oder einer Sonnenschutzverglasung, die ein Vielfaches reflektieren (Größenordnung von 10 % – 30 %). Global betrachtet, ersetzt der PV-Strom insbesondere auch Strom aus thermischen Kraftwerken (Wirth, 2022).

4.9 Biodiversität

Zahlreiche Untersuchungen zu Auswirkungen von Solarparks auf die Biodiversität wurden in den letzten Jahren durchgeführt und belegen eine positive Auswirkung (Parker & McQueen, 2013, Montag et al., 2016). Eine Untersuchung von Planungsunterlagen von **75 Solarparks** zeigte, dass sich der **Artenreichtum** in Solarparks in der Regel deutlich erhöht (SonneSammeln, 2022). Bei richtigem Management kann somit die Biodiversität vergrößert und können neue Lebensräume (habitat islands) für gefährdete Tiere und Pflanzen geschaffen werden (Herden et al., 2009; Sinha et al., 2018; Dhar et al., 2020).

Neben Studien (graue Literatur) gibt es zahlreiche wissenschaftliche Veröffentlichungen, die diese Beobachtungen für einzelne Populationen in Flora und Fauna bestätigen. Im Durchschnitt kann in Solarparks auf **70 % – 95 % des verfügbaren Bodens die Biodiversität gefördert** werden, wenn entsprechende Managementpraktiken umgesetzt werden (Esteves, 2016). Dies stellt eine große Chance für den Naturschutz dar, da solche Flächen in dem Ausmaß in einer konventionell genutzten Kulturlandschaft kaum existieren. So bestätigt auch BNE (2019), dass, wird eine Fläche aus der intensiven Landwirtschaft, bspw. aus dem Energiepflanzenanbau, herausgenommen, in Grünland umgewandelt und darauf eine PV-FFA errichtet, die Biodiversität grundsätzlich zunimmt.

Dass PV-Anlagen auf der grünen Wiese einen Beitrag zur Biodiversität leisten, wird auch in einer ausführlichen, aktuellen Literaturstudie aus der Schweiz (Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften im Auftrag des Bundesamts für Energie, Schweiz) vielfach belegt

(Schlegel, 2021). Maßnahmen wie die Installation und/oder Beibehaltung von Begrenzungselementen wie **Hecken, Gräben, Steinmauern, Magerrasen, Feldrändern** und **Gebüsch**, sowie die **Schaffung von Wildblumenwiesen** mit Pollen- und Nektarpflanzen und die Installation von künstlichen Strukturen wie **Nistkästen, Überwinterungsplätzen** und **Holzstapeln** fördern generell die Biodiversität (Taylor et al., 2019).

4.10 Terrestrische Wirbellose

Durch eine naturnahe Bewirtschaftung von Grünland- und Begrenzungsflächen von PV-FFA wird die pflanzliche Artenvielfalt und, damit direkt verbunden, auch die **Insektenvielfalt** gefördert (Fartmann et al., o.J.). Dazu zählen Blühwiesen bzw. Wildblumen-Ansaaten im Grünland und Hecken, Gräben und Steinmauern zur Förderung von Wirbellosen (Taylor et al., 2019). Diese Flächen können die Artenarmut in normal genutzten Landwirtschaftsflächen ausgleichen (Agha et al., o.J.) und positiv zur Balance von ‚Schädlingen‘ und **Nützlingen** für Kulturpflanzen beitragen. Wird genügend Raum zwischen den Paneelen für hohe Sonneneinstrahlung eingehalten, kombiniert mit permanentem Blühangebot, kommen mehr **Bienen und Bestäuber** vor als auf konventionellen Landwirtschaftsflächen (Parker & McQueen 2013, Vanbergen et al., 2013, Montag et al., 2016, Semeraro et al., 2018, Walston, et al., 2018). Imker können ihre Bienenstöcke unter PV-FFA installieren und vom gezielt gemanagten Blühangebot profitieren (Adomavicius, 2021). Signifikant höhere Individuenzahlen von **Tagfaltern** fanden sich in Solaranlagen mit Wildblumenwiesen im Vergleich zu den unbebauten Kontrollflächen (Ackerland) (Parker & McQueen, 2013). Positive Auswirkungen auf **Heuschrecken, Tagfalter, Spinnen und Laufkäfer** werden im Vergleich zu intensiv ackerbaulich genutzten Flächen erwartet, wenn die PV-FFA als extensives Grünland bewirtschaftet wird, begleitet von Biodiversitätsmaßnahmen. So wurde in fünf deutschen PV-FFA in Bayern mit Flächen zwischen 3 und 12,5 ha eine deutliche Aufwertung im Vergleich zur vorherigen Intensivnutzung mit Fortpflanzungsnachweisen einiger **seltener und bedrohter Arten** gefunden, z.B. Zahnflügel-Bläuling (*Polyommatus daphnis*), Kleiner Schlehen-Zipfelfalter (*Satyrium acaciae*), Lilagold-Feuerfalter (*Lycaena hippothoe*) und Wegerich-Schreckenfaller (*Melitaea cinxia*). Als besonders vorteilhaft erwiesen sich Hecken im Randbereich oder im näheren Umfeld mit Vorkommen von einheimischen «**Schmetterlingsgehölzen**», z.B. Schwarzdorn, Rote Heckenkirsche, Kreuzdorn und Faulbaum (Raab, 2015).

Allerdings können sich negative Effekte ergeben, wenn PV-FFA auf zuvor bereits extensiv genutztem Grünland, wie etwa auf einem Magerrasen, erstellt werden, was zu einer Beeinträchtigung der bestehenden, vielfältigen Wirbellosen-Fauna führen kann (Demuth et al., 2019).

4.11 Reptilien, Amphibien, Vögel

Ein reicheres Insektenangebot führt durch die verbesserte Nahrungsgrundlage zu einer Aufwertung der Habitataignung für viele **Sekundärkonsumenten** unter den Vögeln, Reptilien, Amphibien und räuberischen Wirbellosen ebenso wie Wirbeltieren. Die Installation von künstlichen Strukturen wie Nistkästen, Überwinterungsplätzen und Holzstapeln unterstützt die Ansiedlung von **Reptilien** wie z.B. der Zauneidechse, und von **Vögeln** (Taylor et al., 2019). Für **Graureiher, Rohrweihe, Rotmilan, Baumfalke, Turmfalke, Rauchschwalbe und Star** wurde die Nutzung deutscher PV-FFA als **Nahrungshabitat** nachgewiesen (Badelt et al., 2020). So können PV-FFA die Funktion als Nahrungshabitate für **Fledermäuse** übernehmen (Peschel, 2010), ebenso wie für **Weißstorch, Wiesenweihe** und **Steinkauz** (Badelt et al., 2020). Damit können PV-FFA insbesondere in intensiv genutzten Agrarlandschaften zur Entwicklung wertvoller avifaunistischer Lebensräumen beitragen, zugunsten von **Feldlerche, Rebhuhn und Schafstelze**, vermutlich aber auch für Wachtel, Ortolan und Grauammer (Demuth et al., 2019), sowie vor allem für **verhaltensflexible Kulturlandvögel** (Moore-O'Leary et al., 2017). Auch **Wiesenbrüter** und andere anspruchsvollere Lebensraumspezialisten, z.B. Wiesenpieper oder Braunkehlchen, können profitieren (Günnewig et al., 2007), wie Brutnachweise von 16 **gefährdeten Vogel-Arten des Offenlands** in niedersächsischen PV-FFA, darunter Wachtel, Rebhuhn, Neuntöter, Braunkehlchen und Grauammer bestätigen (Badelt et al., 2020). Auch Untersuchungen aus **Thüringen** in einem 25 ha großen Solarpark zeigen regelmäßig ein Vorkommen von Offenland-Arten wie Feldlerche und Baumpieper während der Brutzeit (Lieder & Lumpe, 2012) in PV-FFA, und eine Studie aus Bayern Rebhuhn, Feldlerche und Baumpieper nach (Raab, 2015). Für gefährdete, thermophile Vögel des Grünlands sind besonnte Streifen von 3 m und mehr besonders fördernd (Peschel, 2010). Dies gilt ebenso für Reptilien (Moore-O'Leary, et al., 2017).

Greifvögel werden durch thermische Luftströmungen oberhalb von PV-FFA angelockt (Dwyer et al., 2018). In Großbritannien wurden Turmfalke und Waldkauz in Solarparks beobachtet, und Turmfalke und **Rotmilan** bei der aktiven Nahrungssuche. Schreiadler und andere Greifvögel zeigten kein ausgeprägtes Meideverhalten gegenüber den Anlagen. In Deutschland wurden Überflüge und Nahrungssuchflüge von **Rotmilan, Mäusebussard, Sperber, Wespenbussard** und **Baumfalke** festgestellt, mit Jagdflügen sowohl im unmittelbaren Randbereich der PV-Anlage und über einem ca. 20 m breiten Grünstreifen innerhalb der PV-Anlage, wobei die Modulkanten als Sitzwarten genutzt wurden (Scheller, et al., 2020). Das Jagdverhalten der Greifvögel innerhalb von PV-Anlage ist abhängig vom Abstand der Modulreihen und der Bewirtschaftung der Flächen, wobei sich eine extensive Grünlandbewirtschaftung positiv auf das Jagdverhalten auswirken soll (Scheller, et al., 2020). Bei **Reihenabständen von fünf bis sechs Metern** dürfte ausreichend Platz vorhanden sein (KNE, 2021a). So stellen Solarparks mit flächigen und störungsarmen Räumen inzwischen **wertvolle Refugien** inmitten einer meist

intensiv bewirtschafteten Agrarlandschaft. Durch eine Kombination von **APV mit Biodiversitätsmaßnahmen** könnten diese Effekte auch in die Agrarlandschaft übertragen werden (s.u.).

4.12 Säugetiere

Es wurden bisher **keine** Beobachtungen einer **Scheuchwirkung oder Meidung** von PVA durch Mittel- und Großsäuger festgestellt (Herden et al., 2009, Günnewig et al., 2007). Hasen, Kaninchen und Rehe wurden innerhalb von PV-FFA beobachtet (Van der Zee, et al., 2019)

Wie oben ausgeführt, profitieren Säugetiere wie **Feldhamster und Hasen** von einer struktur- und artenreichen Agrarlandschaft. Werden mehrjährige Blühstreifen unter den Modulen und am Anlagenrand angelegt, bieten sie Vögeln, Feldhamstern, Feldhasen und Insekten Lebensräume. Eine Dokumentation aus Österreich zeigt, dass sich in der Anlage des Bürger-Solkraftwerks Wien-Liesing **seltene Tierarten** ansiedelten, so neben 13 Heuschreckenarten, Schnirkelschnecken, Faltern wie das Nachtpfauenaug und seltenen Zauneidechsen auch der Feldhamster (Popp-Hackner & Popp, 2014).

PV-FFA können **Feldhamstern** Deckung bieten. In einem Vorkommensgebiet in Thüringen befindet sich eine PV-FFA mit Feldhamsterschutzfunktion in Planung. Einige Bundesländer wie Niedersachsen fördern Hilfsangebote für den Feldhamster als Agrarumweltmaßnahme. Somit sind Ackerstandorte mit Vorkommen von vom Aussterben bedrohter Arten wie Feldhamstern oder seltenen Ackerwildkräutern keine Ausschlussgebiete, wie teilweise gefordert, sondern, im Gegenteil, stellen Solarparks mit Biodiversitätselementen **Habitats** für Säugetieren, Vögeln, Reptilien, Amphibien und räuberischen Wirbellose dar und sind damit **wertvolles Refugium für viele seltener werdende oder bedrohte Arten** inmitten einer meist intensiv bewirtschafteten **Agrarlandschaft** dar (BNE, 2021). In nahrungsarmen Wintermonaten könnten Solarparks Wildtieren neue Nahrungsquellen eröffnen, beispielsweise wegen einer fehlenden Schneedecke (Wagegg & Trumpp, 2015).

Von zahlreichen **Naturschutzorganisationen**, u.a. DNR, WWF, DUH, Germanwatch, Greenpeace, werden **Solaranlagen als Chance für Naturschutz**, und als **Erfordernis für den Klimaschutz** gesehen (Schünemann et al., 2021). Es wird auch vertreten, dass PV-FFA mit bodennahen Solarmodulen das europäisch-ökologische Netzwerk **Natura 2000 stärken** und verschiedene Aspekte der biologischen Vielfalt und der **Ökosystemleistungen verbessern** können (Habitat-Richtlinie 92/43/EWG und Richtlinie 2009/147/EG). Sie stehen im Einklang mit der neuen **Biodiversitätsstrategie für 2030** und fordern die gleichzeitige Erzeugung Erneuerbarer Energien (Win-Win-Lösung), wie z. B. Solarparks, die eine biodiversitätsfreundliches Management bieten (Semeraro, et al., 2020).

4.13 Mögliche negative Einflüsse auf Umwelt, und Verminderungs- und Vermeidungsmaßnahmen

Im Folgenden werden mögliche negative Einflüsse auf die Umwelt kritisch betrachtet und Maßnahmen zu ihrer Vermeidung vorgestellt, die bei ihrer Anwendung eine Umweltverträglichkeitsprüfung oder Einzelfallprüfung generell unnötig machen sollten.

4.13.1 Landschaft

Wie bisher beschrieben, können Solarparks je nach Standort und Gestaltung mit zahlreichen strukturgebenden Landschaftselementen nicht nur Ökosystemdienstleistungen im natürlichen System, sondern auch für das menschliche Auge das **Landschaftsbild sogar aufwerten und abwechslungsreiche optische Strukturen** schaffen. Ausreichend breite, randliche Begrünungen sind zudem klar von den Modulflächen abgrenzbar und können als **Ausgleichsflächen** anerkannt werden. Es können beispielsweise vorherige Äcker zu höherwertigen Flächen werden, so dass keine Kompensation notwendig ist. So wird von Naturschützern eine ‚Kulturlandschaft‘, die oft aus **ausgeräumter Landschaft** mit großen Schlägen von Reinkulturen besteht, auch in Landschaftsschutzgebieten, **nicht als schützenswert** angesehen. Positive Effekte auf Biodiversität und Ökosystemleistungen wurden oben beschrieben.

Landschaftsschutzgesetz (LSG) - Verordnungen enthalten zumeist ein Bauverbot mit Erlaubnisvorbehalt, das derzeit auch für Solaranlagen gilt; auch für die Pflegezonen von Biosphärengebieten gilt ein Erlaubnisvorbehalt für die Errichtung baulicher Anlagen.

Zumeist sind eine geschlossene **Umpflanzung** und Eingrünungsmaßnahmen mit standortheimischen Gehölzen und Sträuchern, je nach Höhe der Module und der Lage im Relief, auch auf Wällen, und auch als Sichtschutz für eine meist notwendige Umzäunung (Durchgängigkeit für Kleintiere mit mindestens 20 cm Bodenabstand) möglich, und größere ungestörte Freiflächen zwischen den Teilflächen der Anlage (**Querungskorridore**) sind Maßnahmen, die eine **Integration in das Landschaftsbild** und eine **optische Einbindung in die Umgebung** bieten (Herden et al. 2009, Cypher et al., 2019). **Auswirkungen** auf das Landschaftsbild können durch eine geeignete Bepflanzung somit **vollständig vermeidbar** sein (Abbildung 45), oder, in ausgeräumten Agrarlandschaften, durch die Gehölzstreifen das Landschaftsbild sogar bereichern. Zudem gelangen Anlagen in Kuppen- oder Tallage meist weniger ins Sichtfeld als Anlagen in weithin sichtbaren Hanglagen, und nächstgelegene Höhenzüge begrenzen in der Regel den Sichtraum. Auch die Auswahl visuell vorbelasteter Gebiete kann eine Einbindung in das Landschaftsbild erleichtern

Module sind heutzutage in allen **Farben** erhältlich, und können sich in der Farbwahl an die Landschaft anpassen. Auch die noch wenig verbreitete, organische PV ermöglicht eine größere farbliche Flexibilität und dezentere Farbwahl der Paneele, welche deutlich

lichtdurchlässiger sind als kristalline Module, allerdings derzeit noch einen geringeren Wirkungsgrad und bisher kurze Haltbarkeit aufweisen (Neidlein, 2020).

Fertigstationshäuser aus Beton werden frostsicher ca. 0,80 m tief (je nach Standort und Stationstyp) gegründet (Baden-Württemberg Umweltministerium, 2019). Dieses **Technikgebäude** (Trafohäuschen) kann zur Verringerung der visuellen Auswirkungen auf das **Landschaftsbild angepasst** werden, in der farblichen Gestaltung, mit Reduzierung von Reflexionsmöglichkeiten und einer möglichen Verschalung mit Holz, bzw. einer Eingrünung.



Abbildung 45: Beispiel für die standortangepasste Gestaltung einer PV-FFA (Hietel et al., 2021) Fotos: Lenz,C., 2020. Pfeil zeigt auf PV-FFA.

Synergien mit dem Naturschutz und der Landwirtschaft (APV) können genutzt und eine Einbindung in das Landschaftsbild sichergestellt werden. Dadurch werden Naturgüter möglichst sparsam und schonend in Anspruch genommen, was die Anlage umso nachhaltiger gestaltet. *„Wenn infolge der Neugestaltung die Wirkungen des Eingriffsvorhabens selbst in den Hintergrund treten und die Landschaft nicht dominieren oder prägen, oder eine Veränderung des Landschaftsbilds optisch wahrnehmbar bleibt, kann von einem vollständigen Ausgleich ausgegangen werden“* (Jessel et al., 2003).

4.13.2 Reflexionen

Zur Vermeidung von optischen Reflexionen oder einer möglichen Blendwirkung werden heutzutage **Module mit Antireflexbeschichtung** eingesetzt. Reflexionseigenschaften in Bezug auf mögliche Störungen von Tieren (z.B. Polarisationssebene des reflektierten Lichtes) können reduziert werden. Kürzlich wurde eine Unattraktivität von **bioreplizierten PV-Beschichtungen** auf das Eiablageverhalten von Bremsen und Eintagsfliegen nachgewiesen (Fritz, et al., 2020). PV-Paneele mit weißer Rückseitenfolie waren 10-mal bis 26-mal weniger attraktiv für Wasserinsekten als Paneele ohne weiße Streifen zwischen den Solarzellen (Horváth et al., 2010).

Eine **Vortäuschung einer Wasserfläche** durch Solarfelder für einen Vogelanflug **konnte nicht nachgewiesen** werden, und für (Greif-) Vögel sind sie keine Jagdhindernisse, und Kollisionen sind nicht zu erwarten (Harrison et al., 2016, Herden et al., 2009). **Reflexionen** werden als für Vögel als **nicht störend eingeschätzt** (Günnewig et al., 2007, Herden et al., 2009) Matte **Antireflexionsbeschichtungen** (ARB) erwiesen sich in einer ungarischen Untersuchung bei Bremsen als am deutlichsten **anflugsmindernd**, weniger bei Zuckmücken, und als indifferent bei Eintagsfliegen (Száz, et al., 2016). Gewöhnlich werden heutzutage Module von dunkler Farbe mit Antireflex- Beschichtungen verwendet. Die Blendung und Reflexion sind erheblich niedriger als die Blendung und Reflexion durch normales Glas und andere reflektierende Flächen.

Auch für Tragekonstruktionen werden reflexarme Materialien, z.B. lackierte Metallgestänge, verwendet. Starke **Blendwirkungen** durch Lichtreflexionen und hierdurch bedingte Irritationen z.B. beim **Vogelzug** sind aufgrund der Lichtstreuung bzw. Lichtabsorptionseigenschaften der Module offenbar ebenfalls von **geringer Relevanz**.

4.13.3 Kontaminationen

Module und Tragekonstruktionen enthalten Schadelemente, die Gefahr einer Bodenkontamination durch PV-Anlagen mit Blei oder Cadmium bei intakten Solarmodulen wird allerdings als **sehr gering** eingeschätzt (Ebert & Müller, 2011). Öltransformatoren sind in Wasserschutzzone III (bzw. III A) nur im „üblichen Rahmen von Haushalt und Landwirtschaft“ zulässig sowie in der gesamten Zone III nur mit besonderen Sicherheitseinrichtungen (**Auffangraum, Doppelwandigkeit**) (LfU, 2013).

Dagegen können Trockentransformatoren bzw. estergefüllte Transformatoren mit **nicht wassergefährdendem, synthetischem Ester** (MIDEL 7131) oder natürlichem Ester (ENVIROTEMP FR3) befüllt und **nicht wassergefährdende Öle** verwendet werden, welche auch hinsichtlich einer Brandgefahr und der Brandfolgen als wesentlich risikoärmer einzuschätzen sind. **Ramm- oder Schraubgründungen mit minimaler Versiegelungswirkung** anstelle von Betonstreifenfundamenten kommen zur Verankerung in Betracht, ebenso wie **Spinnanker** (s. Kapitel 3.3). Verzinkte Rammprofile oder Erdschraubanker (z. B. Krinner, BTEC bis 1,6 m Tiefe) dürfen nur eingebracht werden, wenn die Eindringtiefe über dem höchsten Grundwasserstand liegt. In der ungesättigten Bodenzone dagegen bestehen keine grundsätzlichen Bedenken gegen einen Einsatz von verzinkten Stahlprofilen. Da die vertikale Sickerströmung parallel zu ihnen verläuft, bleiben Lösungsprozesse und -mengen sehr begrenzt, und die ohnehin geringere Benetzung mit Sickerwasser wird durch die Abschirmwirkung der Solarmodule weiter gemindert. Ein möglicher Eintrag von **Zink über das Sickerwasser** wird daher zu **keinen relevanten Verunreinigungen des Grundwassers** führen. Entlang von Ramm-, Rüttel- oder Schraubgründungen entstehen bevorzugte **Wasserwegsamkeiten** zwischen der

Oberfläche der Gründungselemente und dem Untergrund. Zumindest bei Starkregen kann dies einen Eintrag vorhandener Schadstoffe begünstigen, was gerade in der Bauphase besondere Vorsicht verlangt. Ansonsten wäre das **Infiltrieren** in den Boden ein **gewünschter Effekt**, insbesondere in der Landwirtschaft. Insgesamt werden die betriebsbedingten Auswirkungen von PV-FFA auf den Boden und den Wasserhaushalt **als unerheblich eingestuft** (Badelt et al., 2020). Auch Ebert & Müller (2011) halten die Gefahr einer Bodenkontamination durch PV-FFA mit Blei oder Cadmium bei intakten Solarmodulen für sehr gering. **Defekte Module** sollten im Sinne des präventiven Bodenschutzes aus der Anlage **entfernt** werden (AL-agele et al., 2021).

4.13.4 Boden

Durch **Kabelgräben** werden Deckschichten verändert, was einen naturnahen Wiedereinbau des Bodens mit entsprechender Verdichtung erfordert. Bei der Beurteilung dieser Maßnahme ist zu beachten, dass derzeit beispielsweise auf Ackerflächen das früher schon übliche **Tiefpflügen mit Schächten unter die Verdichtungszone** wieder empfohlen wird, um Humus in tiefere Bodenschichten zu verlagern und ungesättigtes Unterbodenmaterial an die Oberfläche zu bringen, das organische Substanz besser bindet, um letztendlich mehr Kohlenstoff im Boden zu sequestrieren und Wasser- und Nährstoffvorräte des Unterbodens für die Kulturpflanzen besser erreichbar zu machen (Don, 2014). Eine Kabelanbringung ist auch unterhalb der Module möglich.

Auch Hörnle (2021) hält eine **Systeminstallation, ohne die landwirtschaftliche Fläche zu beschädigen**, für möglich. Schwere Kräne oder eine Baustellenmontage sind nicht notwendig, und nach rechtlich verbindlichen Bestimmungen sollen insbesondere Bodenverdichtungen vermieden werden (BAFU, 2001; Bellini, 2015). Es sollte nur bei trockenen Böden gebaut werden, mobile **Fahrstraßen** aus Kunststoff und leichte Fahrzeuge und Maschinen sollten verwendet werden (Abbildung 46) (Hietel et al., 2021). Gegen trotzdem mögliche Bodenverdichtungen sollten lockernde Maßnahmen wie beispielweise tiefwurzelnde **Pfahlwurzlerbegrü- nung** als Kompensation durchgeführt werden. Gute Erfahrungen bestehen mit Bodenlockerung im Weinbau.



Bodenschutzplatte Typ varioMAT 1+ (vormals eMat)

Technische Daten varioMAT 1+

- Material: Polyethylen, hochmolekular
- Maße: 1200 x 2400 x 14,5 mm (inkl. Profil)
- Gewicht: Ca. 36 kg / Platte
- Oberfläche: Einseitig profiliert
- Traglast: ca. 60t (abhängig vom Untergrund)
- Farbe: schwarz-bunt

Abbildung 46: Bodenschutzplatten zur Verwendung gegen Bodenverdichtungen (Rotec, o.J.).

4.14 APV

Eine Definition für APV, aktuelle APV-Technologien und die Chancen der doppelten Landnutzung für Landwirtschaft und Energiewende wurden in den vorangehenden Kapiteln bereits vorgestellt. Landnutzungskonflikte lassen sich abmildern oder vermeiden, bzw. in Synergien mit positiven Effekten für die Pflanze und die Energiegewinnung wie auch das Einkommen für die Landwirte, umkehren. Mit Bezug auf die Ausführungen zu PV-FFA sollen im Folgenden die **Vorteile von APV für die Landwirtschaft** und eine mögliche Rolle von APV bei der **Integration von Naturschutzaspekten** in Verbindung mit einer **regenerativen Landwirtschaft** dargestellt werden (Nordberg et al. 2021). Auch diverse **Umwelt- und Naturschutzorganisationen** unterstützen im Positionspapier ‚**Biodiversitätsfördernde Agri-Photovoltaik vorantreiben**‘ dieses Konzept (Schünemann et al., 2021). So werden im Folgenden die Einflüsse von hoch-aufgeständerten APV-Anlagen auf die Ressourcen Boden, Wasser und Mikroklima betrachtet, während direkt ertragswirksame Aspekte in Kapitel 5 behandelt werden.

Durch APV kann die **Produktivität einer Landwirtschaftsfläche** um bis zu **70 %**, in manchen Jahren sogar **90 %** gesteigert werden (Weselek et al., 2019; Trommsdorff et al., 2021). Energetisch betrachtet könnte mit einer Belegung von **1 % der globalen Ackerfläche** der **gesamte Energiebedarf der Menschheit** gedeckt werden (Adeh et al., 2018). Damit wäre laut Miskin

et al. (2019) das globale Potential der APV ausreichend für die Energieversorgung von mehr als 10 Milliarden Menschen.

APV-Anlagen können positive Auswirkungen auf Pflanzen und Ernteerträge wie auch auf **Ökosystemleistungen** haben und der **Anpassung an den Klimawandel** dienen, allerdings kann eine Beschattung von generell 30 % bei hoch-aufgeständerten Anlagen auch einen Ertragsrückgang schattenempfindlicher Kulturpflanzen verursachen – welche aber unter Stressbedingungen wie Trockenheit und Hitze auch von der Beschattung der Module profitieren können (Barron-Gafford, et al., 2016; Weselek, et al., 2019). Die landwirtschaftliche Produktivität kann in der Kombination von Anbau und Energiegewinnung um bis zu 70 % gesteigert werden und damit das Einkommen der Landwirte diversifiziert, stabilisiert und erhöht werden (Weselek et al., 2019), parallel mit einer essenziellen Verbesserung der Ökosystemleistungen (Semeraro, et al., 2020).

4.14.1 Boden, Wasser und Erosion

Durch ihre Durchlässigkeit für Licht und Wasser sind APV-Anlagen sowohl der Landwirtschaft als auch dem Fortbestand des Ökosystems dienlich, während sie gleichzeitig eine Schutzfunktion übernehmen, je nach Anlagendesign.

Im Bereich Boden wurden erhöhte **Bodenfeuchtigkeit** und **gesteigertes Wasserhaltevermögen** beschrieben, was zu einer Ertragssteigerung von unter den Modulen angebauten Gurken und Salat beitrug (Marrou et al., 2013a). Zudem wurde eine **reduzierte Bodentemperatur** beobachtet. Adeg et al. (2018) berichten von einem bemerkenswerten, positiven Einfluss der APV Anlage auf Bodenfeuchtigkeit (Abbildung 47), mit stark erhöhten Werten unter den Modulen (solar fully covered area) oder in der teilweise modulbedeckten Fläche (solar partially covered area), insbesondere in Bodenschichten von 20-60 cm. Sie sehen Vorteile von APV in **semi-ariden Gebieten** - die den **Thüringer Gebieten in den Sommermonaten ähnlich** sind – und berichten von **90 % Ertragssteigerungen in Weideland** durch eine erhöhte Bodenfeuchtigkeit während der gesamten Beobachtungszeit und erhöhte Wassernutzungseffizienz unter Beschattung.

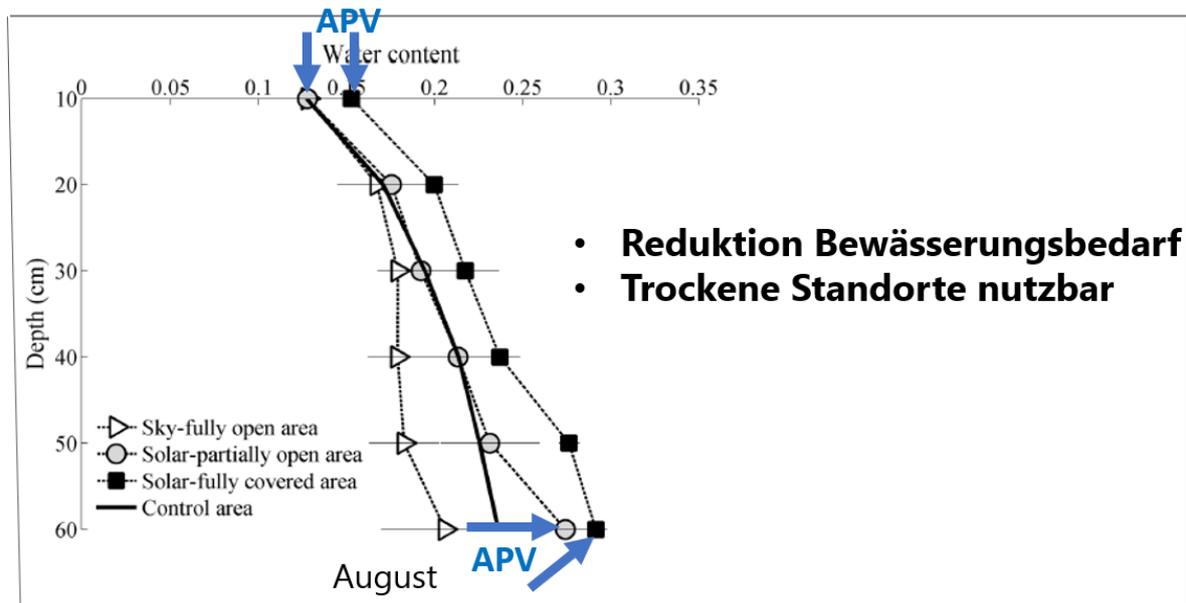


Abbildung 47: Veränderung der Bodenfeuchte an verschiedenen Messpunkten unter der APV-Anlage und unter freiem Himmel in Abhängigkeit von der Bodentiefe (angepasst nach Adeg et al., 2018).

Veränderungen der Bodenfeuchtigkeit mit einer Steigerung um 1,9 % in einem Jahr und einer Verringerung um 3,1 % in einem anderen Jahr wurden aus einer 0,3 ha hoch-aufgeständerten Anlage berichtet (Weselek et al., 2019, 2021). Im Weizen war der volumetrische Wassergehalt des Bodens auf der APV-Fläche im Vergleich zur Referenzfläche leicht erhöht (4,1 %), wohingegen er im Klee gras reduziert war (-6,4 %). Bodenfeuchtemessungen unter den Modulen und einer Freifläche in einer Versuchsanlage an der HTW Dresden zeigen einen **verringerten Bodenfeuchterückgang** in Trockenperioden unter den Modulen (pers. Mitt. Feistel, HTW Dresden). Zusammen mit entsprechenden Globalstrahlungs- und Bodentemperaturwerten bestätigen sie die **reduzierte Verdunstung** der beschatteten Flächen. Auch in einer britischen PV-FFA ergaben sich während der Vegetationsperiode auf Grasland kühlere Bodentemperaturen und eine höhere Bodenfeuchtigkeit unter den Paneelen im Vergleich zu den Lücken zwischen den Paneelreihen (Makaronidou, 2020). Auch Schindele et al. (2018) beobachteten einen ‚cooling-effect‘ der Substratoberfläche direkt unter den PV-Paneelen einer APV-Anlage (Schindele et al., 2020). In einer PV Anlage mit Schafbeweidung wurde eine höhere Bodenfeuchtigkeit direkt unter den Paneelen gemessen und im Rahmen eines Forschungsprojektes eine **Effizienzsteigerung der Wassernutzung um 328 %** im Vergleich zu beweideten Referenzböden außerhalb der Solaranlage festgestellt (Adeg et al., 2018). Dies kann auf eine verminderte Evapotranspiration unter den Modulen zurückzuführen sein (Badelt et al., 2020). In tieferen Bodenschichten gleichen sich die Unterschiede durch auf das Wasser wirkende Kapillareffekte wieder aus (Badelt et al., 2020, Elamri et al., 2018). In einer APV Anlage mit Aprikosenanbau in Frankreich ergab sich laut einer Studie eine **Wassersparnis von 70 %**, und

in einer Weinplantage in Piolenc versehen mit Tracking-Systemen verringerte sich der Bewässerungsbedarf (Vandest & Hemetsberger, 2021). Neben Bodenschutzfunktionen kann auch mit direkten und indirekten Klimaschutzfunktionen durch die APV Anlage gerechnet werden, die zu einer erhöhten Kohlenstoffspeicherung im Boden führen (Nordberg et al., 2021).

Beachtung sollte in diesem Zusammenhang auch die Möglichkeit des **Auffangens von Regenwasser** finden, das über eine PV-versorgte Tröpfchenbewässerung den Kulturen wieder zugeführt bzw. bei einem geschlossenen System der Be- und Entwässerung als mit Düngemitteln angereichertes Wasser wieder recycelt werden kann (s. Kapitel 7.2). Ein verstärkter Abfluss von den Modulen bei Starkregen könnte je nach Modulaufbau in Brachezeiten oder bei wenig Vegetation unter den Modulen zu Bodenerosion führen, allerdings wurde nach 3 Wintern in der Anlage in Heggelbach keine Bodenerosion festgestellt (Trommsdorff et al., 2021). Regenrinnen, Spalten zwischen Modulen oder andere Modifikationen können hier Abhilfe leisten.

4.14.2 Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit

In zahlreichen Studien wird über eine Verringerung der Lufttemperatur und Erhöhung der Luftfeuchtigkeit unter den Modulen in den APV-Anlagen berichtet (Weselek et al., 2021a, Barron-Gafford, et al., 2016). So war die **mittlere jährliche Luftfeuchtigkeit unter Solarmodulen um 2,8 % höher** im Vergleich zur Kontrolle (Weselek et al. 2021a), und die tägliche mittlere **Lufttemperatur im Durchschnitt um etwa 1,1 °C niedriger unter APV, mit besonderer Ausprägung in der Sommerzeit** (Weselek, et al., 2021b). Auch Adeg et al. (2018) stellten für alle Messhöhen eine signifikante Erhöhung der Luftfeuchtigkeit fest. In einer Anlage in Südfrankreich wurden um 4°C niedrigere Lufttemperaturen gemessen (Champetier, et al., 2021). Über veränderte Minimal- und Maximaltemperaturen eines Tages bzw. geringere Schwankungen in der Lufttemperatur sowie kühlere Tages- und höhere Nachttemperaturen berichtet Armstrong (2016), während Marrou et al. (2013a) keinen Unterschied in der mittleren, täglichen Lufttemperatur und in der Luftfeuchtigkeit zwischen der Anlage und dem Referenzfeld beobachteten. Diese Effekte verringern den Trocken- und Hitzestress und erhöhen die Wasserproduktivität der Pflanzen, mit direkten Auswirkungen auf den Ertrag, und teilweise Ertrags erhöhungen bis um das Dreifache, wie bei Tomaten beobachtet (Barron-Gafford, et al., 2016) (s. Kapitel 5.6.6).

Erhöhte Nachttemperaturen gegenüber den Umgebungstemperaturen, wie von Günnewig et al. (2017) berichtet, können einer **Frostgefahr und Schädigungen** der Blüten im Obstbau vorbeugen, bei großen Anlagen aber ggf. in Gebieten, wo eine Ausgleichsfunktion durch Kaltluft erwünscht ist, einen negativen Einfluss haben. Durch höhere **Blatttemperaturen** am frühen Morgen ergibt sich eine **geringere Taubildung** auf den Blättern, was negative Auswirkungen auf einen Krankheitsbefall haben sollte.

Damit ergeben sich generell positive Auswirkungen durch veränderte mikroklimatische Bedingungen für die Kulturpflanzen, jedoch sind diese von Anlagendesign und den lokalen Verhältnissen abhängig. Die Aussagen machen auch deutlich, dass sich die Effekte hauptsächlich auf Bereiche unter den Modulen beziehen, und damit weniger mit einer Veränderung der lokalen Temperaturverhältnisse zu rechnen ist, und eine APV-Anlage möglichen Grünzäsuren in der Landschaft nicht widersprechen sollte.

4.14.3 Biodiversität

Die Biodiversität in einem landwirtschaftlichen System ist abhängig von der Bewirtschaftungsweise. APV ist sowohl für konventionellen als auch ökologisch orientierten Anbau geeignet. Generell sollten sich bezüglich **Bodenleben durch erhöhte Bodenfeuchtigkeit** und im Sommer **niedrigere Temperaturen** unter den PV-Modulen Vorteile entwickeln, und die Bedingungen für **Insekten**, und damit auch deren **Prädatoren** sollten, in Anlehnung an die Untersuchungen in PV-FFA, günstiger als im Vergleich zu Referenzflächen sein. Ausschlaggebend für die Biodiversität ist allerdings die Verwendung von Pflanzenschutzmitteln, die aber, wie Beobachtungen in den Niederlanden zeigten, unter APV reduziert werden können. Empfehlenswert ist eine Kombination aus **biodiversitätsfördernden Maßnahmen, regenerativer Landwirtschaft** und PV Modulen mit einem dazu passenden Design.

Eine Einbindung von **Blühwiesenstreifen** beispielsweise direkt unter (niedrig aufgeständerten) Modulen (s. Abbildungen 48, 49, 50) kann ebenso die Biodiversität erhöhen wie **Sichtschutzanpflanzungen mit Gehölzen**. Die Verwendung standortgerechten, gebietsheimischen Saat- und Pflanzguts kann zu Erhalt und der Förderung der regionalen, genetischen Variabilität beitragen. **Aus Agroforstsystemen sind die positiven Auswirkungen von Gehölzstrukturen auf Boden und Wasser (Wind- und Wassererosionsschutz, Erhöhung der Wasserhaltekapazität, Wasser- und Nährstoffpumpe‘ durch tiefwurzelnde Bäume), Biodiversität** (Habitat für Insekten, insbesondere Nützlinge, Vögel und andere Kleintiere) und **zum Klimaschutz** (Kohlenstoffanreicherung im Boden) sowie als zusätzliche **Einkommensquelle** bei Nutzung von Holz und Früchten (Wildobst wie Holunder, Felsenbirne, Nüsse wie Walnuss und Haselnuss) bzw. als Schneitelfutter, bekannt (Alam, et al., 2014; Torralba et al., 2016; Hart, et al., 2017). Im Landschafts- und Artenschutz kann APV auf Weideflächen zusätzlich die Lebensräume für Rote-Liste-Arten und Bienen erhöhen (Ressar, 2020).



Abbildung 48: Mehrfachnutzungskonzept auf landwirtschaftlichen Flächen (Hietel et al. 2021).



Abbildung 49: Honigbienen auf Eagle Point Solar Farm, Oregon (NCSL, 2020).

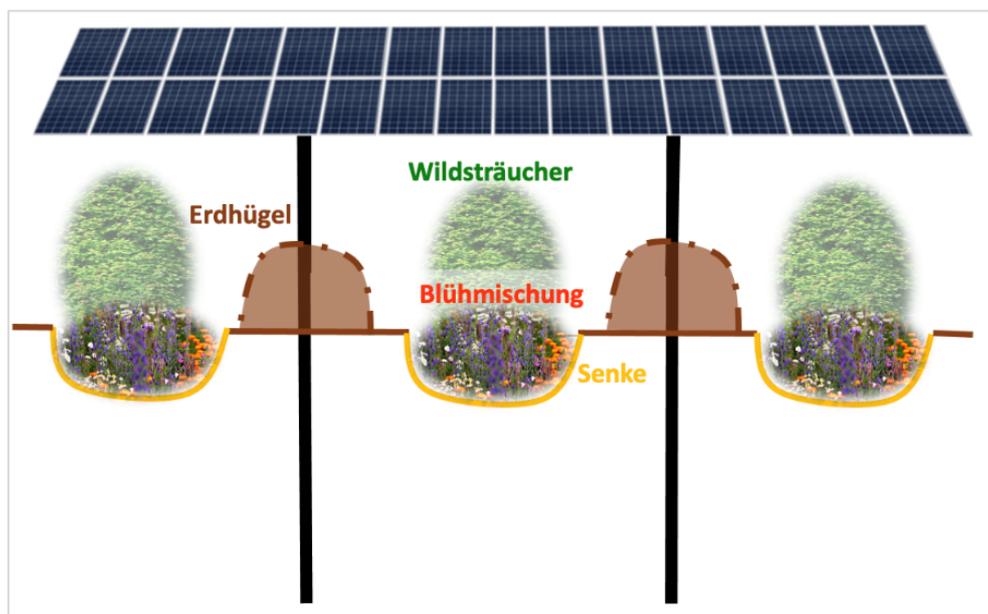


Abbildung 50: Photovoltaik, Artenschutz und Landwirtschaft auf einer Fläche (Korrmann, e-wind Betreiber- und Vertriebs-GmbH).

4.15 Fazit

Die ausführliche Studie zu möglichen Effekten von PV-FFA auf Umwelt und Natur auf Basis wissenschaftlicher Publikationen, ergänzt durch Studien aus der grauen Literatur, zeigt, dass die **PV-FFA** in den meisten, untersuchten Fällen keine negative, sondern **positive Auswirkungen auf Umwelt und Biodiversität** haben. In PV-FFA mit Biodiversitätsfördermaßnahmen wie Blühstreifen erhöhte sich die Biodiversität von Flora und Fauna, speziell auch in Bezug auf bedrohte Arten. Mögliche lokale Umweltauswirkungen durch die Anlagen oder deren Installation, beispielsweise auf den Boden, und Vermeidungsmaßnahmen zumeist technischer Art wurden analysiert. Durch einfache Verminderungs- und Vermeidungsmaßnahmen lassen sich mögliche Effekte bis zu einer Irrelevanz reduzieren.

Viele der Ergebnisse zu PV-FFA sind auch **auf APV-Anlagen anwendbar**, insbesondere, wenn diese mit biodiversitätsfördernden Maßnahmen wie Blühstreifen und einer Umrandung aus Hecken und Sträuchern kombiniert sind, während andere Einschränkungen, die beispielsweise die Umzäunung betreffen, für hoch-aufgeständerte Anlagen nicht zutreffen - ebenso wenig wie die gewünschte Vermeidung von Veränderungen der oberen Bodenschicht, die eine regelmäßige Maßnahme im Ackerbau ist. Bei der Beurteilung der **Umwelt- und Naturwirkung** von APV-Anlagen muss daher von einer **Referenzackerfläche** in der Umgebung ausgegangen werden, sowie von den Bearbeitungsmaßnahmen, die zur ‚guten, fachlichen Praxis‘ zählen, wie pflügen, düngen, und Verwendung von Herbiziden, Insektiziden und Fungiziden – zur ‚selektiven Bekämpfung der Artenvielfalt‘ aufgrund ihrer Konkurrenz zum Ziel der Landwirtschaft, der Produktion eines Erntegutes. APV-Anlagen mit Gehölzumrandung bringen Strukturelemente in die Agrarlandschaft und können das **Landschaftsbild positiv** verändern. Im

Bundesnaturschutzgesetz ist die **landwirtschaftliche Bodennutzung m.E. nicht als Eingriff** anzusehen.

Für APV-Anlagen sind Ergebnisse zu Mikroklima, Boden, Wasser und zu Kulturpflanzen (s. Kapitel 5) bereits in genügender Anzahl vorhanden, um Schlüsse zu ziehen: Erhöhung von Boden- und Luftfeuchtigkeit, erhöhte Boden- und Lufttemperatur (Schutz vor Spätfrost) im Frühjahr und Schutz vor Trockenheit und Hitze im Sommer. Die Auswirkungen auf das Mikroklima sind für Kulturpflanzen und Böden als positiv zu bewerten. Die Anlagen schützen zudem ‚mechanisch‘ vor Hagel und Starkregen, Wind, Hitze sowie Sonnenbrand, je nach Anordnung der Module. Durch erhöhte Bodenfeuchtigkeit bis in größere Tiefen verringert sich der Bewässerungsbedarf signifikant, was nicht nur für die Landwirte kostengünstig ist, sondern gesamtgesellschaftlich die Verfügbarkeit des knappen Guts Wasser erhöht.

Zur ‚guten fachlichen Praxis‘ zählen auch **genehmigungsfreie Schutzkonstruktionen** wie Hagelnetze oder Folien im Spargelanbau, unter die auch die APV-Anlagen fallen sollten. Mit Beeinflussungen von Vögeln, Insekten und Säugern in größerem Maß als ohne die Anlagen ist nicht zu rechnen, im Gegenteil sollten die **positiven Auswirkungen auf Mikroklima, Boden, Wasserhaltevermögen (Ökosystemleistungen), Biodiversität** und auf Kulturpflanzen unter Stressbedingungen eindeutig überwiegen. Damit sollte ein Genehmigungsverfahren für APV-Anlagen auf gewöhnlichen Ackerflächen (inkl. Sonderkulturen) für Landwirte ebenso unnötig sein.

Zur Beurteilung des Systems sind der zu erwartende, steigende **Ertragsrückgang aufgrund des Klimawandels** und der zusätzliche **Stromertrag** von der Fläche zu kalkulieren. Es sollte zudem beachtet werden, dass die Entwicklung von PV-Paneelen hin zu ortsflexiblen Modulen, dünnen Beschichtungen auf verschiedenen Materialien und auch PV-Folien und sogar PV-Netzen geht, die **eher an Kulturen als an Ackerflächen gebunden** sein werden. Details und Optimierungen bedürfen weiterer Forschung.

Auf Basis der Ergebnisse dieses Kapitels wird empfohlen, einen **Leitfaden für ‚gute fachliche APV-Praxis‘**, ähnlich dem für ‚gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft‘ zu entwickeln, der Landwirt*innen und Installateur*innen zur Orientierung dient und, ebenso wie in der Landwirtschaft, von ihnen befolgt wird. Dieses Kapitel hat dazu die Begründung geliefert.

5 Anbau unter APV-Anlagen

Um APV-Anlagen in den landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Anbau zu implementieren, werden ihre **Einflüsse auf die Agrarökosysteme und die angebauten Kulturen** betrachtet. **Diese Einflüsse variieren stark zwischen den unterschiedlichen Anlagentypen.** Generell lässt sich aber konstatieren, dass die Erträge einiger Kulturen in Kombination mit Energieerzeugung auf derselben Fläche verglichen mit der getrennten Erzeugung von Energie und Nutzpflanzen um bis zu 30 %, in Fällen von Grünland sogar bis zu 90 % gesteigert werden können (Dinesh & Pearce, 2016; Adeg et al. 2018). So lässt sich die Gesamtproduktivität der agri-photovoltaisch genutzten Fläche generell um 60 % – 70 % (Dupraz, et al., 2011a), in Untersuchungen in Deutschland um 70 %, und in trockenen Jahren sogar um 90 % (Trommsdorff et al., 2021) steigern. Die Beschattung kann auch dazu beitragen, die Bodenfeuchtigkeit und Wasserspeicherkapazität des Bodens zu erhöhen, was zu einem Anstieg der Frischmasse führen und die Wassereffizienz bis zu 328 % steigern kann (Adeg et al., 2018).

Generalisierte Aussagen über Kulturen und ihre Anbaueignung unter APV-Anlagen sind schwer zu treffen. Allerdings ist bei der Beurteilung möglicher, negativer Effekte von APV durch Beschattung auf Kulturen zu beachten, dass bisherige Referenzerträge ohne APV unter den schon beobachteten und den zukünftig zu erwartenden Klimaveränderungen kaum mehr Gültigkeit haben werden. Es muss zwischen zu erwartenden Ertragsverlusten durch Trockenheit und Extremereignisse wie Starkregen, Sturm, Hagel oder Hitze **und** einem möglichen Ertragsverlust durch Beschattung unter APV, aber einem Benefit durch die schützende Wirkung der Schattierung, abgewogen werden. Für jede Region kann unter Betrachtung aller möglichen Anlagentypen, deren jeweiligen Vor- und Nachteilen, der aktuellen sowie perspektivischen Klimabedingungen und der kulturspezifischen Eigenschaften die bestmögliche Kombination ausfindig gemacht werden (Nordberg et al., 2021). Dies sollte aber eine Einführung der APV-Anlagen in die Praxis nicht verzögern, da die positiven Klimaanpassungsleistungen durch APV-Anlagen auf pflanzenbauliche Kulturen und Böden in bisherigen Untersuchungen überwiegen. Weiterhin ist mit zusätzlichen Stromerträgen zu rechnen. Die Auswirkungen auf die Betriebe durch die Implementierung von APV-Anlagen ist sowohl wirtschaftlich als auch pflanzenbaulich abschätzbar. Marrou et al. (2013a) fügen noch hinzu, dass der Übergang zu einem APV-System nur geringe Anpassungen erfordert. Sie verweisen aber auch auf den Einsatz strahlungseffizienter Kulturen, sowie bestmögliche Abschwächung der Lichtreduzierung.

Marrou et al. (2013a) kamen in ihren Untersuchungen in einer APV-Anlage zu dem Schluss, dass die Schattierung den stündlichen Temperaturverlauf der Pflanzen während eines Tages beeinflusst. Tauablagerungen auf den Blättern können dadurch in den Morgenstunden verhindert werden, wodurch die Infektionswahrscheinlichkeit durch Krankheitserreger verringert wird, auch die Transpiration ging zurück (Marrou et al., 2013a). Die durchschnittlichen Tagestemperaturen, sowie die Wachstumsraten der schattierten Pflanzen unterschieden sich nicht

von der Kontrolle. Bis drei Wochen nach der Pflanzung konnten signifikante Erhöhungen in der Frischmasse bei den schattierten Varianten von Salaten und Gurken und der Blattemissionsrate gemessen werden. Nachteilig wirkt sich die Schattierung im Winter auf Kulturen aus (Dupraz, et al., 2011b). Hier wären beispielsweise Winterroggen, -weizen, -gerste, Winterraps als landwirtschaftliche Kulturen zu nennen. Allerdings kann dieser Nachteil über das Jahr verteilt je nach Kultur ausgeglichen werden. Im Folgenden werden grundlegende Daten zum Potential von APV in der Landwirtschaft in Thüringen ausgewertet und kritisch betrachtet, und Empfehlungen zur Einführung von APV gegeben.

5.1 Thüringen als Agrarstandort

Thüringen verfügt über 16.202 km² Bodenfläche und 23 Landkreise. Vierundfünfzig Prozent der Bodenfläche sind Landwirtschaftsfläche, 32 % Waldfläche, 10 % Siedlungsfläche und 4 % der Fläche fallen auf Gewässer, Abbauland, Öd- und Unland sowie Übungsgelände (Graf, 2018). Innerhalb der Agrargebiete spiegeln sich die jeweiligen Eigenschaften der dominierenden Naturräume, die in Thüringen divers sind, da es Einflüsse aus dem Mittelgebirge, den Ackerhügelländern, Buntsandstein- und Muschelkalkgebieten gibt (Abbildung 51). Daraus ergeben sich Unterschiede in der Bodenchemie und der Bodenphysik, aber auch klimatische Unterschiede. Alle drei Faktoren bestimmen prägend die landwirtschaftliche Nutzbarkeit der Böden.

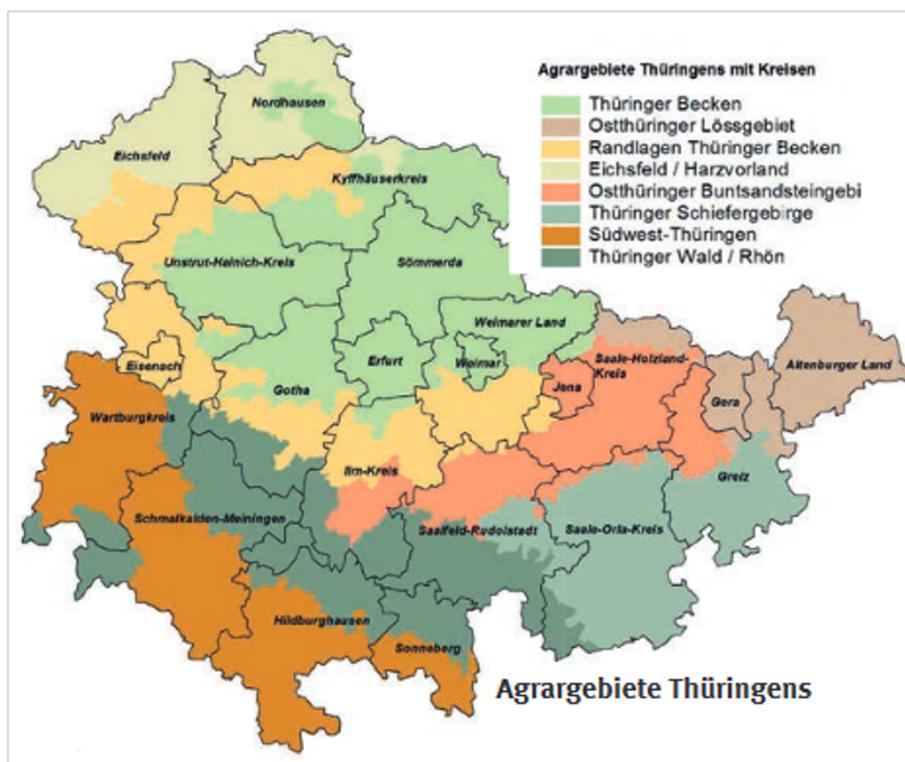


Abbildung 51: Agrargebiete Thüringens (Graf, 2018).

Um die Agrargebiete bezogen auf ihre klimatischen Eigenschaften einschätzen zu können, wurde auf die Wettermessdaten des Thüringer Landesamts für Landwirtschaft und Ländlichen

Raum (TLLLR) zurückgegriffen, welches ein thüringenweites Wettermessnetz installiert hat. In Tabelle 2 wurden einige Messstationen in den entsprechenden Agrargebieten herausgegriffen und deren Durchschnittswerte für bestimmte Parameter für die Jahre 2017-2021 rechnerisch ermittelt (Michel, 2022).

Tabelle 2: Klimatische Parameter in Thüringen bezogen auf die entsprechenden Agrarräume und exemplarischen Landkreise; Durchschnittswerte im 5-jährigen Mittel von 2017 – 2021; die Farben entsprechen in etwa der Legende aus Abbildung 51 (Michel, 2022).

Agrargebiet	Landkreise	Jahrestemperatur in °C	Jahresniederschlagssumme in mm	Luftfeuchte in %	Jahresbodentemperatur in 5 cm in °C	Windgeschwindigkeit m/s	Strahlung in kWh/q	Frosttage T _{min} < 0 °C	Heiße Tage T _{max} > 30 °C	Vegetations-tage T >= 5°C
Thüringer Becken / Randlagen	Kyffhäuserkreis Unstrut-Hainich-Kreis	9,9	494	74	10	1,2	1.122	66	9	251
Thüringer Becken	Gotha Weimarer Land	9,8 9,4	505 490	82 74	10,5 10,5	1,8 1,6	1.180 1.197	61 91	10 9	262 253
Eichsfeld	Eichsfeld	9	750	85	9,3	1,7	1.036	71	6	241
Süd-West-Th.	Wartburgkreis Hildburghausen	9,7 8,8	585 697	72 78	11 10	1,5 1,5	1.132 1.126	74 106	10 8	255 238
Thüringer Wald / Rhön	Saalfeld-Rudolstadt	7,9	692	75	9,4	2	1.136	95	2	219
Thüringer Schiefergebirge	Saale-Orla-Kreis	8,9	605	75	9,7	2,4	1.252	84	6	239
Ostthüringer Lössgebiet	Altenburger Land	10,4	520	79	10,2	1,4	1.012	63	15	265
Ostthüringer Buntsandsteingebiet	Saale-Holzland-Kreis	9,6	590	79	10,4	0,8	1.115	97	16	250

Die durchschnittliche **Jahrestemperatur** im 5-jährigen Mittel liegt im Thüringer Wald 7,9 °C am niedrigsten, und mit 10,4 °C liegt die **höchste Temperatur** im Agrargebiet, **Thüringer Lössgebiet**. Im Eichsfeld herrscht mit durchschnittlich 9,3 °C die niedrigste und im **Thüringer Becken** mit 11,6 °C die **höchste Bodentemperatur**. Auch die Niederschlagsmengen unterschieden sich zum Teil erheblich. So ist das Thüringer Becken das **trockenste Gebiet** mit **Niederschlagssummen** zwischen 490 und 513 mm im 5-jährigen Mittel. Im Agrargebiet Eichsfeld wurde die höchste Niederschlagsmenge mit 750 mm erreicht. Die geringen Niederschläge gerade im Thüringer Becken, welches als einer der **Hauptagrarstandorte** auf Grund hoher Ackerzahlen zu sehen ist, führen zu häufigen **Ertragsausfällen** auf Grund von Trockenheit und zu einem erhöhten Einsatz von **Zusatzbewässerung**. Die **Windgeschwindigkeiten** lassen sich in drei Kategorien einteilen. Im 5-jährigen Mittel liegt nur das Ostthüringer Buntsandsteingebiet mit < 1 m/s, Windgeschwindigkeiten zwischen 1 und 2 m/s wurden teilweise

im Thüringer Becken, im Eichsfeld, im Ostthüringer Lössgebiet und in Süd-West-Thüringen gemessen, und 2 m/s und mehr konnten im Thüringer Wald, im Thüringer Schiefergebirge und im Thüringer Becken – Landkreis Weimarer Land festgestellt werden. Höhere Windgeschwindigkeiten steigern die Evapotranspirationsrate zusätzlich, was die Trockenheit gerade bezogen auf das **Thüringer Becken** weiter verstärkt. Die **Globalstrahlung** der letzten 5 Jahre über die gesamten Agrargebiete hinweg betrachtet lag bei durchschnittlich 1.128 kWh/m². Von diesem Mittelwert wich das Thüringer Schiefergebiet mit 1.252 kWh/m² am deutlichsten ab. Die schwächste Einstrahlung wurde in den Agrargebieten im Osten und Norden Thüringens gemessen. Besonders stark variieren die **Frost- und Hitzetage** in Thüringen, welche über einen großen Einfluss auf die Vegetation verfügen. Im besonderen Maße **frostgefährdet** scheinen die Regionen im Osten, Süden und Westen Thüringens zu sein. Hildburghausen sticht mit 106 Tagen heraus. Frost stellt vor allem eine Gefahr bei der Blütenbildung dar und kommt in seinem ganzen Ausmaß dann im reduzierten Fruchtertrag zum Tragen. Betroffene Kulturen sind beispielsweise **Getreidearten**, aber auch **Raps, Ackerbohnen** und **Erbsen**. Bei den gartenbaulichen Kulturen ist vor allem der **Obstbau** stark getroffen. Die Anzahl **heißer Tage** ist mit 15 und 16 im **Osten Thüringens** auffällig hoch und im Süden mit 2 und 6 Tagen gering. Bei den Vegetationstagen verhält es sich recht homogen. Hier sticht vor allem der Thüringer Wald mit knapp 20 – 40 Tagen weniger heraus.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass einige Gebiete auf Grund der klimatischen Einflüsse für die Landwirtschaft ungünstigere Bedingungen aufweisen als andere. Besonders negativ beeinflusst sind hier das **Thüringer Becken**, die Randlagen des Thüringer Beckens, das **Ostthüringer Lössgebiet**, sowie das **Ostthüringer Buntsandsteingebiet**. Hier herrschen höhere Durchschnittstemperaturen und hohe Sonneinstrahlung. Zudem sind nur geringe Windgeschwindigkeiten zu messen, welche die Wärme zusätzlich stauen. Niederschlag fällt hier nur in geringem Maße (s.a. Abbildungen 7-10). Die Anzahl der **Frosttage** ist deutlich erhöht, was gepaart mit **höheren Temperaturen** und höhere Sonneinstrahlung schnell zu **Frostschäden** an den Kulturen führen kann, da diese in ihrem Vegetationsverlauf schon fortgeschrittener sind, als Kulturen, die an kühleren, weniger sonnigen Standorten gedeihen.

Die **phänologische Uhr** für Deutschland zeigt, dass alle Jahreszeiten im Vergleich der Jahrzehnte von 1961 – 1990 und von 1991 – 2020 in den letzten Dekaden früher beginnen (Abbildung 52). Exemplarisch, und als Indikatorpflanzen, bedeutet dies für Apfel und Holunder, zwei relevante Kulturen in Thüringen, dass die Gefahr des Blütenfrostes durch die klimawandelbedingte Verfrühung der Blüte deutlich erhöht ist und es hier zu relevanten Ertragseinbußen kommen kann. Dies gilt aber ebenso für Sommergetreidearten (s.o.). Weiterhin erkennbar ist auch die extrem verringerte Anzahl an Wintertagen.

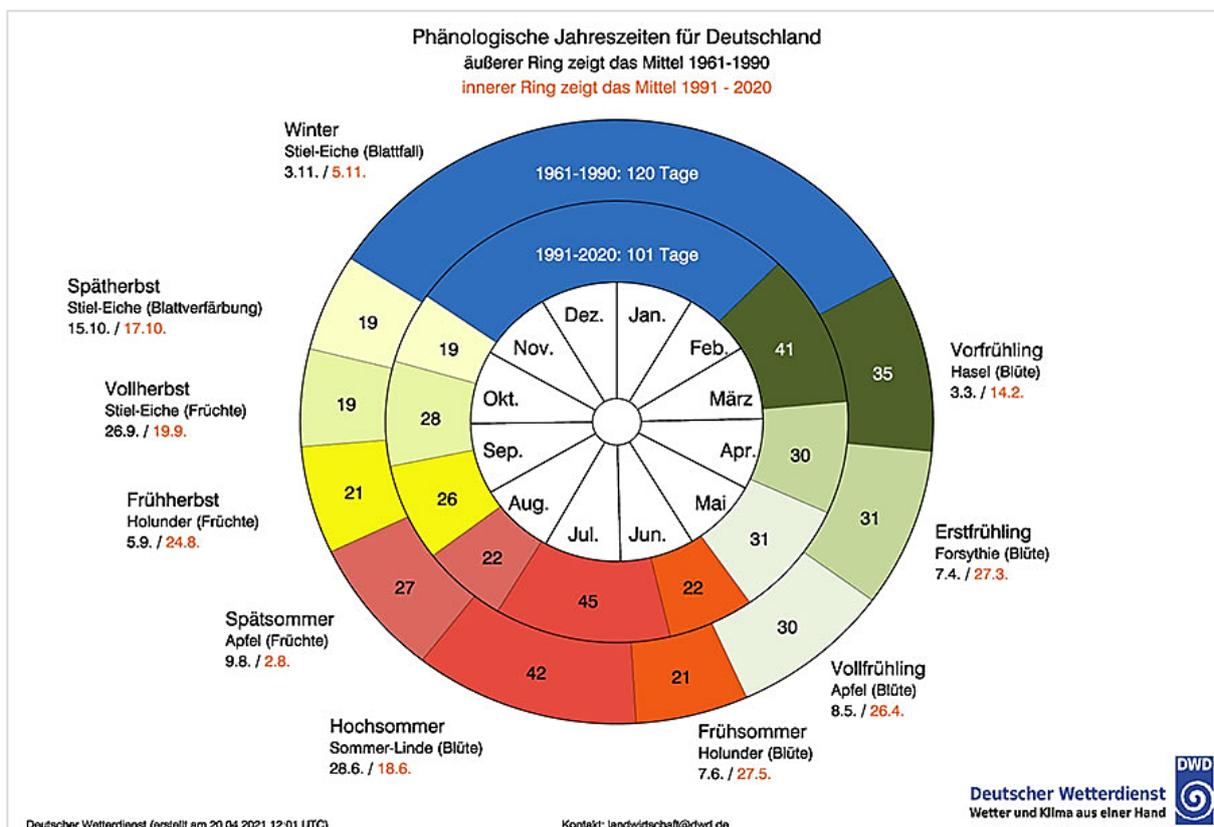


Abbildung 52: Phänologische Uhr Deutschland (DWD, 2021).

Ein weiteres Charakteristikum zur Beschreibung der Agrargebiete ist die **Ackerzahl**, welche die Qualität des Bodens beschreibt (Graf, 2018). Eine Zahl von > 50 wird von den normalerweise ertragreichen Böden im Thüringer Becken, im **Ostthüringer Lössgebiet** und im Eichsfeld erreicht (**40 – 60**). Danach folgen die Randlagen des Thüringer Beckens und das Thüringer Schiefergebirge mit Zahlen zwischen 30 und 50. Zwischen 20 und 40 liegen das Ostthüringer Buntsandsteingebiet und Süd-West-Thüringen. Die geringsten Zahlen erreicht der Thüringer Wald mit Werten zwischen 15 und 30. Ein Großteil der Gebiete gehört nach EU-Kriterien zu den benachteiligten Gebieten, die als schwach ertragsfähig eingestuft werden (s. Abbildung 44). Den Ackerzahlen und den klimatischen Bedingungen Rechnung tragend, fällt die Bewirtschaftung der einzelnen Agrargebiete sehr unterschiedlich aus, wie Abbildung 53 zeigt.

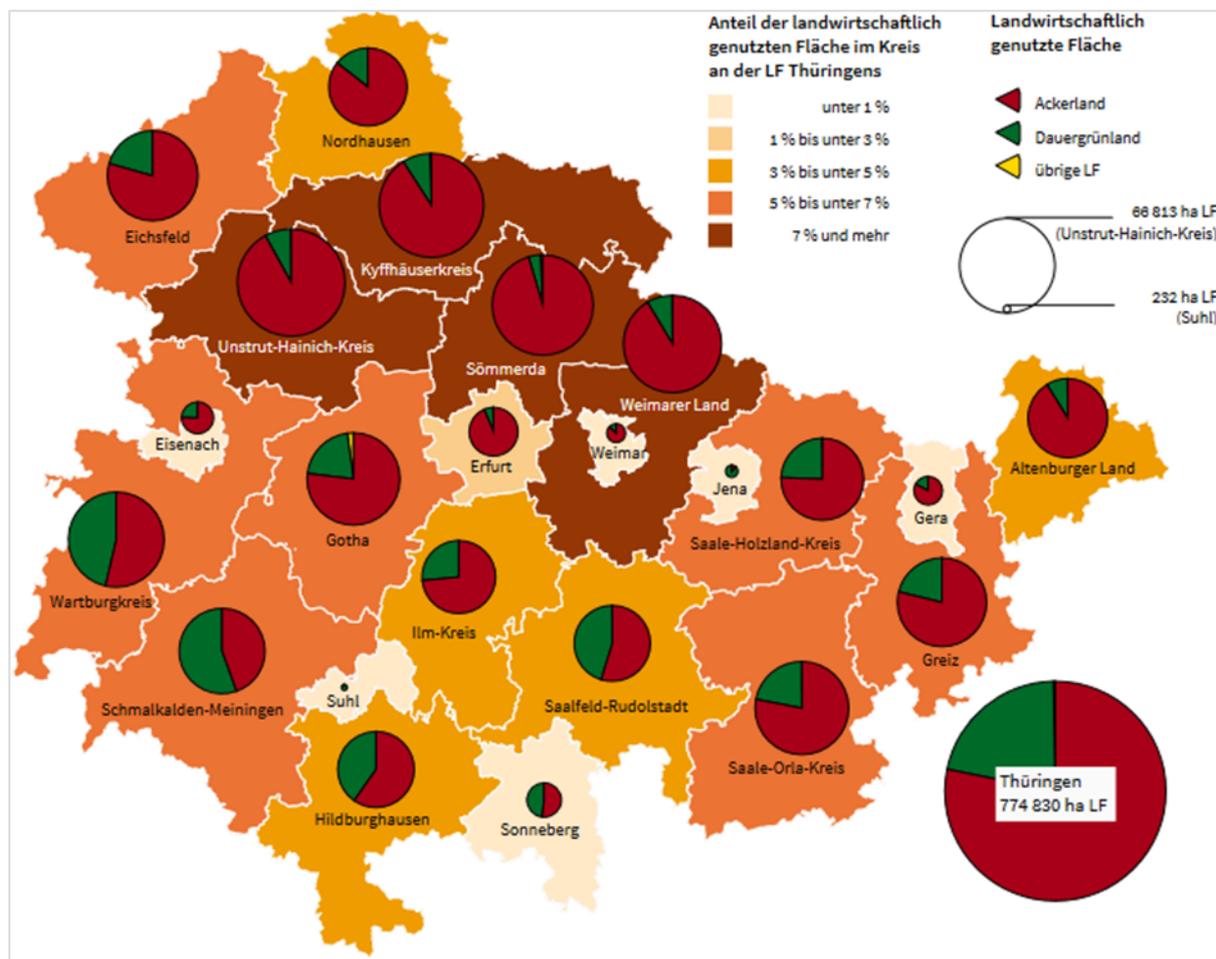


Abbildung 53: Landwirtschaftliche Nutzfläche und deren Anteile differenziert nach Ackerbau und Grünland auf das Bundesland Thüringen und seine Landkreise übertragen (Schreiber, 2021).

Deutlich hervor stechen hier das Thüringer Becken und seine Randlagen. Hier ist einerseits milderes Klima vorzufinden und andererseits bestehen hier auch die höchsten Ackerzahlen. Dies macht sich auch in dem nur geringen Anteil an Flächen für Dauergrünland bemerkbar. Im Norden und Osten Thüringens, bis auf das Altenburger Land mit den Lössböden, fällt der Anteil mit Ackerbau etwas geringer aus. Im Süden und Westen ist einerseits der Anteil an landwirtschaftlicher Nutzfläche geringer und andererseits der Anteil an Dauergrünlandflächen höher. **Insgesamt wurden in Thüringen im Jahr 2020 774.830 ha für landwirtschaftliche Produktion genutzt (TLS, 2021). Dabei entfielen 604.086 ha auf Ackerland, 2.280 ha auf Dauerkulturen und 168.399 ha auf Dauergrünland.**

Auf der Basis der Reservestoffeinlagerung in die jeweiligen Speicherorgane wird in der Landwirtschaft unterschieden nach Körnerfrüchten, Wurzel- und Knollenfrüchten, Futterpflanzen sowie Sonderkulturen (Diepenbrock et al., 2016). Dieser Einteilung entsprechend dominieren **Körnerfrüchte mit 470.121 ha** die ackerbauliche Landschaft in Thüringen. Hierzu zählen **Getreidearten mit 356.240 ha** Anbaufläche, davon **Weizen und Gerste** als dominanteste

Kulturen (Abbildung 54), **100.449 ha Ölpflanzen**, sowie **Hülsenfrüchte mit 13.422 ha** (Abbildung 55) (TLS, 2021).

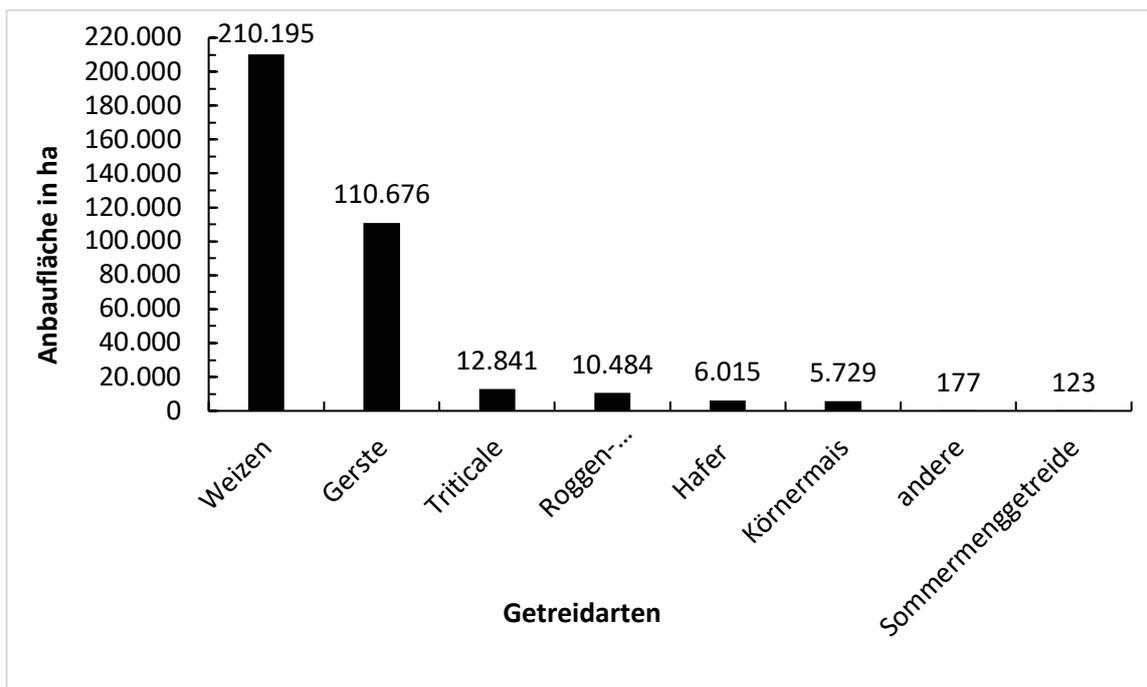


Abbildung 54: Anbaufläche der in Thüringen angebauten Getreidearten (TLS, 2021).

Unter den Ölpflanzen fällt der größte Anteil auf Raps (98.620 ha). Hülsenfrüchte werden auf 13.422 ha angebaut, hier dominiert die Körnererbse die Anbaufläche (TLS, 2021) (TLS, 2021).

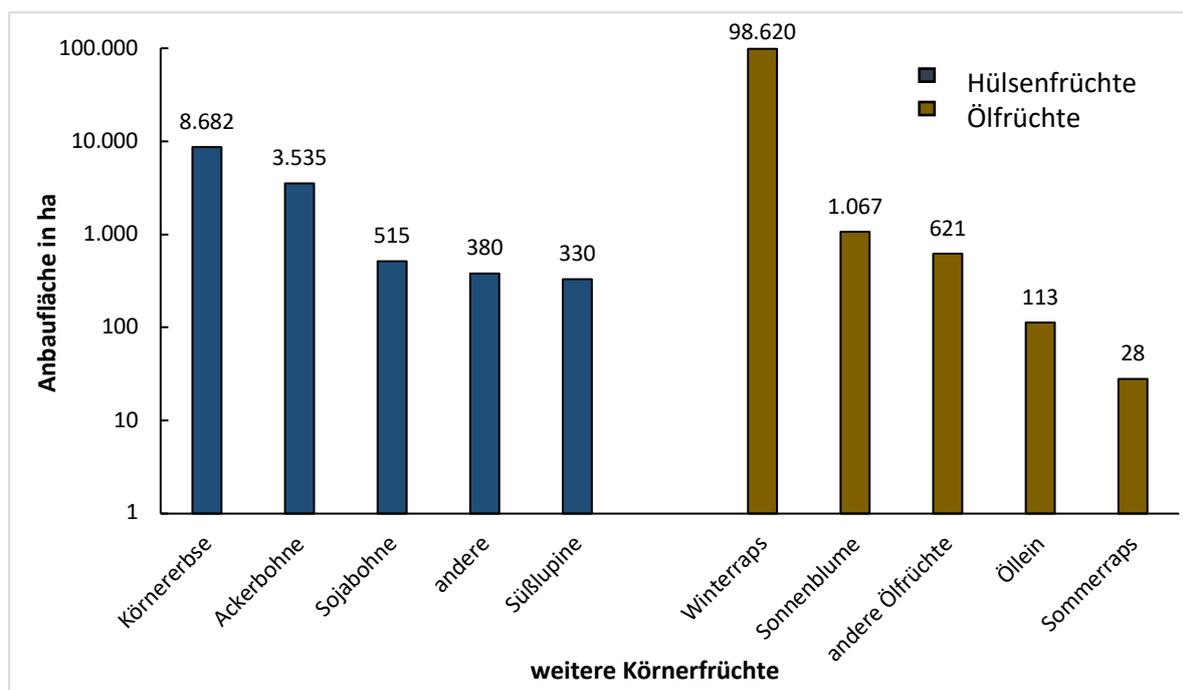


Abbildung 55: Körnerfrüchte und ihre jeweiligen Anbauflächen in ha im Jahr 2020 in Thüringen, logarithmiert zur besseren Skalierung (TLS, 2021).

Den **zweitgrößten Anteil** machen die **Futter- und Energiepflanzen** aus, welche auf 102.540 ha angebaut werden (Abbildung 56). Hier dominiert der Mais mit knapp zwei Drittel die Anbaufläche. **Energiepflanzen** separat betrachtet, machten in einer letzten Erhebung des TLLR in Thüringen im Jahr 2015 110.000 ha aus (ca. 14 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche), mit **45.000 ha Raps**, **55.000 ha hauptsächlich Mais** für Biogas und **10.000 ha Getreide** für Bioethanol (Reinhold, 2015). Dazu kämen noch die Schnitte von Grünland, die teilweise auch in die Biogasgewinnung einfließen.

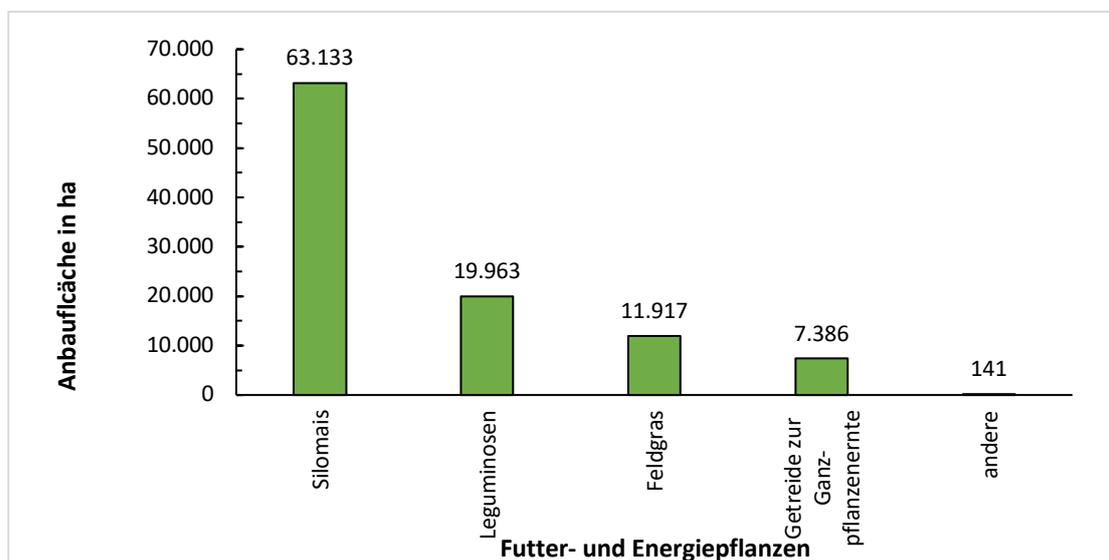


Abbildung 56: Kulturarten aus dem Bereich Futter- und Energiepflanzen und ihre jeweiligen Anbauflächen in Thüringen 2020 (TLS, 2021).

Ein flächenmäßig kleinerer Anteil (12.977 ha) wird mit **Wurzel- und Knollenfrüchten** bestellt, davon 11.100 ha mit Zuckerrüben und 1.670 ha mit Kartoffeln (Abbildung 57).

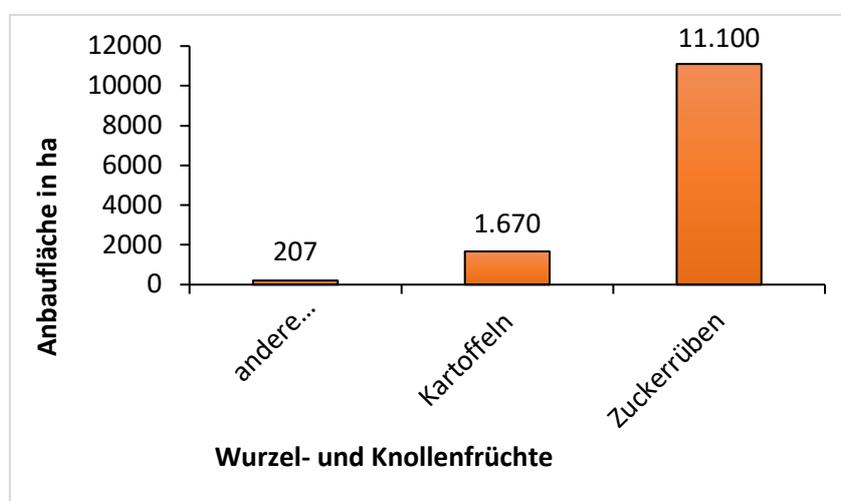


Abbildung 57: Wurzel- und Knollenfruchtarten nach Anbaufläche in ha in Thüringen 2020 (TLS, 2021).

Auf 7.628 ha wurden im Jahr 2020 **Sonderkulturen in Thüringen** angebaut (Tabelle 3) (TLS, 2021). Hiervon sind der **Hanf** mit 533 ha und die **Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen** mit 988

ha bundesweit von Bedeutung. Beide Flächen entsprechen jeweils 11,9 % der Anbaufläche Deutschlands (Schreiber, 2021). Auf 400 ha wurde **Hopfen** angebaut (Weidemann, 2020) und auf 1.292 ha der Fläche für Sonderkulturen wurden gartenbauliche Erzeugnisse produziert. Hierunter fallen **Gemüse** und **Erdbeeren** mit 1.041 ha, **Blumen** und **Zierpflanzen** mit 89 ha, **Gartenbausämereien**, **Jungpflanzen** mit 163 ha. **Saat- und Pflanzgut** für Gräser und Hackfrüchte (ohne Kartoffel) werden auf 1.401 ha und **Speisepilze** auf 1 ha. Die Dauerkulturen unter den Sonderkulturen nehmen insgesamt 2.280 ha ein. Auf sonstige Kulturen im Bereich der Sonderkulturen entfallen 349 ha und auf Brachen befinden sich auf 13.102 ha (TLS, 2021).

Tabelle 3: Darstellung der angebauten Sonderkulturen in Thüringen 2020 in Bezug auf die Anbauflächen; *Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen; ** Saat- und Pflanzguterzeugung für Gräser, Hackfrüchte (ohne Kartoffeln) und weitere Handelsgewächse (ohne Ölfrüchte); *** Walnüsse, Haselnüsse, Esskastanien (TLS, 2021).

Kultur	Fläche in ha	Kultur	Fläche in ha
Speisepilze	1	Baumschule Freiland	130
Sämereien und Jungpflanzen GWH	2	Sämereien & Jungpflanzen Freiland	161
Baumschule GWH	2	sonstige Kulturen	349
andere Dauerkulturen	6	Hopfen	400
Nüsse ***	11	Hanf	533
Blumen & Zierpflanzen GWH	20	Baumobst - Steinobst	717
Gemüse & Erdbeeren GWH	37	HDG*	988
Blumen & Zierpflanzen Freiland	69	Gemüse & Erdbeeren Freiland	1004
Rebflächen	78	Baumobst - Kernobst	1117
Weihnachtsbaumkulturen	109	Saat- und Pflanzgut**	1401
Beerenobst ohne Erdbeeren	110		

Unter den Gemüsearten dominieren stark Spargel, Weißkohl, Speisezwiebeln und Blumenkohl (Abbildung 58).

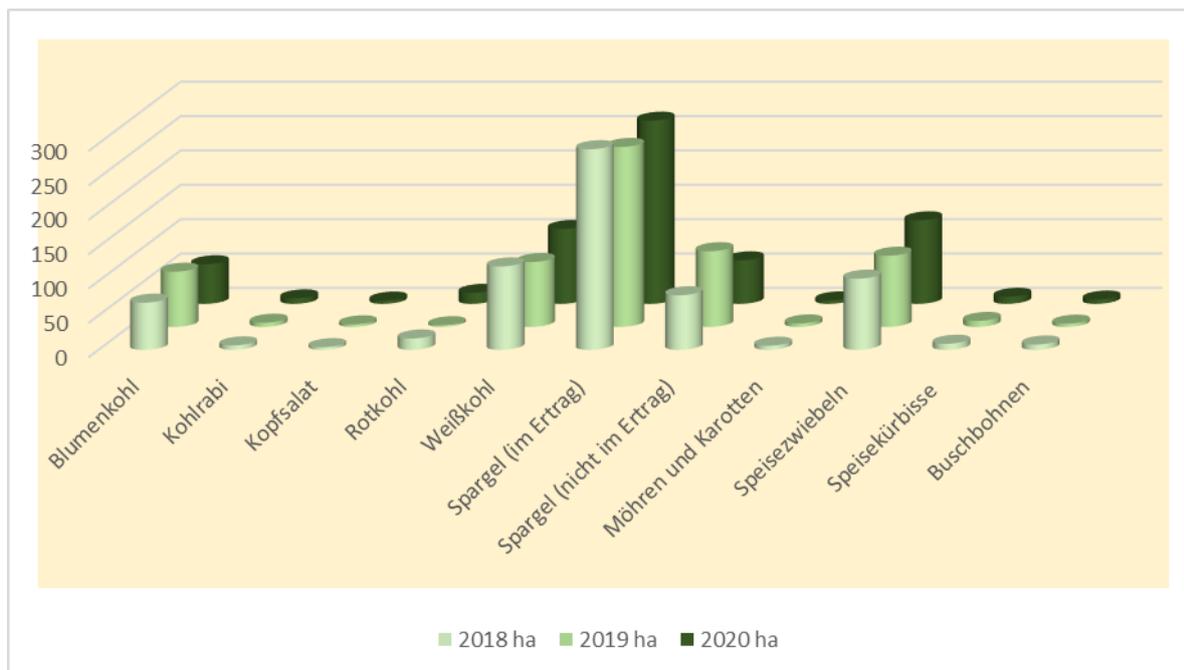


Abbildung 58: Anbaufläche der zehn häufigsten Gemüsearten in Thüringen 2018 – 2020 (Käferle, 2021).

Diese gesamt-thüringische Sicht kann nun im Weiteren ausdifferenziert werden, um das etwaige Potential von APV-Anlagen konkret für die jeweiligen Agrargebiete und Landkreise berechnen zu können. Eine Tabelle im Anhang 1 stellt die **Hauptkulturen** (ohne Dauergrünland, sonstige Flächen) mit ihren jeweiligen Anbauflächen in den Landkreisen unter Zuordnung der entsprechenden Agrargebiete.

5.2 Ertragsverluste in Landwirtschaft und Gartenbau durch Klimawandel

Am Standort Berlin-Dahlem wurde die Entwicklung klimatologischer Referenzwerte über drei Perioden (1961-1990/1971-2000/1981-2010) gemessen; diese Daten werden hier als Vergleichswert für die **Entwicklung in Thüringen** herangezogen. Die **Sonnenscheindauer** nahm seit der ersten Periode um rund 100 Stunden zu. Dies hob die **durchschnittliche Jahresmitteltemperatur** um 0,6 °C, die **Verdunstungsrate** um 41,4 mm, und die negative **klimatische Wasserbilanz** nahm um 24 mm zu (Diepenbrock et al., 2016). Am **Standort Erfurt** in Thüringen betrug die Durchschnittstemperatur im langjährigen Mittel 10,5 °C, was einen Anstieg um 1,7°C darstellt (Michel, 2022). Die Niederschlagsmengen lagen bei 494,2 mm, was einen durchschnittlichen Rückgang von 16,1 mm zeigt. In Erfurt wurden im langjährigen Mittel 1975 Sonnenstunden gemessen – eine Zunahme von durchschnittlich 387 Stunden. Erhöhte Sonnenscheindauer und höhere Temperaturen führen zu erhöhter Reaktionsgeschwindigkeit der biochemischen Prozesse in den Kulturpflanzen, was sich wiederum positiv auf das Wachstum und die Substanzbildung auswirken kann. Als Negativauswirkung gelten Sonnenbrand, Wassermangel und bei **extrem hohen Temperaturen Schäden** u.a. in der Pollen- und damit Fruchtbildung, was einen Wachstumsstopp verursachen kann. Limitierend kann eine

ungenügende **Wasserversorgung** sein (Diepenbrock et al., 2016). Dies kann zur Zeit der Aussaat, aber auch in der Zeit des Aufwuchses bis hin zur Ernte gravierende Folgen für die Kultur mit sich bringen. Der **Transpirationskoeffizient** gibt Aufschluss darüber, mit welcher Effizienz Nutzpflanzen das zur Verfügung stehende Wasser ausnutzen können und entsprechend besser oder schlechter mit Wasserknappheit bezogen auf die Ertragsbildung reagieren. **Die Mehrheit der in Thüringen angebauten Kulturen weisen einen hohen Transpirationskoeffizienten auf, sind also wenig trockentolerant** (Tabelle 4). Dies bedeutet im Umkehrschluss, dass dem **Wassermanagement eine sehr hohe Bedeutung** zu kommt. Bei steigenden **Temperaturen** und einer ansteigenden **Sonnenscheindauer** muss mit einer höheren **Evapotranspirationsrate** gerechnet werden, und damit mit einem Verlust an **Bodenfeuchtigkeit** sowie Verlust von **verfügbarem Wasser** für die Pflanze. Der Trockenheit Rechnung tragend wird in der neuen Fruchtfolgeempfehlung von Agroscope und Agridea auf diesen Punkt eingegangen (Jeangros & Courvoisier, 2019). Von den insgesamt 35 beschriebenen Kulturen werden Wintergerste, Winterroggen, Körner- und Silosorghum und Luzerne als ‚gut trockenheitsverträglich‘, 13 Kulturen als ‚mittelmäßig trockenheitsverträglich‘ und **18 als ‚schwach trockenheitsverträglich‘** definiert (Anhang 2). **Bei den trockenheitsverträglichen Kulturen spielen nur Wintergerste und Winterroggen in Thüringen eine größere Rolle.**

Tabelle 4: Transpirationskoeffizienten ausgewählter Kulturpflanzen (Diepenbrock et al., 2016).

Arten	Transpirationskoeffizient (l H ₂ O kg ⁻¹ TM)
Hirsen	200-300
Mais, Beta-Rüben	300-400
Gerste, Roggen, Hartweizen	400-500
Kartoffel, Weichweizen, Sonnenblumen	500-600
Hafer, Raps, Erbse, Ackerbohne, Rotklee	600-700
Luzerne, Lein, Soja, Kohlrübe	> 700

Insgesamt gesehen sollen sich die **Niederschlagsmengen** perspektivisch um 10 % erhöhen, allerdings verteilen sie sich heterogener im Jahresverlauf (Frühauf, 2019), was einerseits zur Verknappung in den Sommermonaten und andererseits zu einem Überhang im Winter führen soll. Letzteres führt zu **Erosion, Überschwemmung und Nährstoffauswaschung**, besonders, wenn Äcker im Winter nicht mit Vegetation bedeckt sind. Die Trockenheit führt zu **Trockenstress** bei den Pflanzen und damit zu einer verminderten **Photosyntheserate**. Zudem sollen sich Niederschlagsmengen von Jahr zu Jahr hoch variabel zeigen, und in Trockenperioden sollen immer wieder Starkregenereignisse auftreten, was das Klima schwer

vorhersehbar und das entsprechende ackerbauliche Management ebenso schwer planbar macht (Frühauf, 2019).

In der Kategorie der Niederschläge ist auch **Hagel** zu nennen, welcher ertragslimitierend durch die Zerstörung von Blattflächen, Blüten, Früchten oder gar des Holzes wirkt. Der Gartenbau wirkt dem bereits mit kurzlebigen Hagelschutznetzen entgegen, die flächendeckend über die gartenbaulichen Kulturen gespannt werden und nach wenigen Jahren ersetzt werden müssen. Dennoch sind 26 % der Ernteschäden in Deutschland auf Hagel zurückzuführen (s. Abbildung 5).

Mit insgesamt 62 % Ernteschäden wirken sich Temperaturveränderungen allerdings am stärksten auf das Pflanzenwachstum aus. Besonders betroffen sind hier Kulturen aus dem Obstbau und Wein gefolgt von gemüsebaulichen Kulturen, Getreide und Raps. **Spätfröste** innerhalb eines sich etablierenden Bestandes können zum Teil bis zum **kompletten Ertragsausfall** führen, wenn diese beispielsweise zur Zeit der schon jetzt immer früher im Jahresverlauf auftretenden Blütenbildung auftreten, die die Blüten frostgefährdeter machen. Im Obst- und Weinbau traten im Frühjahr 2020 extrem starke Schäden in der Blüte, an Knospen und Fruchtaussetzungen durch Spätfröste mit Ertragseinbußen von bis zu **51 % im Obstbau** und **42 % im Weinbau** auf, was die Betriebe in ihrer Existenz bedrohte (Tabelle 5) (Eisenach-Online, 2021). Während Starkfröste bis -25 °C im Jahr 2021 stark schädigten, führte das dann folgende kühle und feuchte Frühjahr zu einer verspäteten Vegetationsentwicklung mit ungünstigen Bedingungen zur Befruchtungszeit (TMIL, 2022). Es traten auch in **2021** wieder Schäden in **Kirschen** durch **Spätfröste** auf, diesmal noch um 30 % erhöht gegenüber 2020. Auch bei **Zwetschgen** und **Pflaumen** führten ungünstige Befruchtungsbedingungen und Blütenfröste zu den niedrigsten Erträgen seit 2007 (Abbildung 59), ebenso werden im **Wein** die Verluste auf 30 % – 50 % gegenüber dem langjährigen Mittel eingeschätzt. Bereits im Jahr 2020 wurden im Weinbau Ausfälle von **20 % – 100 %** vermerkt, was eine um 68 % geringere Ernte als zum sechsjährigen Mittel darstellt. Im **Obst- und im Weinbau** waren mit Abstand die höchsten **Verluste** zu verzeichnen. Im **Spargel** lagen die Verluste durch die 2021 kühle Witterung bei 14 % unter dem langjährigen Mittel.

Tabelle 5: Ertragsverluste der wichtigsten Obstarten in Thüringen gegenüber dem mehrjährigen Durchschnitt (Durchschnittsertrag von fünf Vorjahren unter Ausschluss des höchsten und des niedrigsten Wertes) (TMIL, 2021a).

Obstart	Ertrag 2020 in dt/ha	Verlust ggü. Durchschnitt in %
Äpfel	161,9	-46,6
Birnen	77,5	-24,3
Süßkirschen	38,0	-51,1
Sauerkirschen	66,9	-38,5
Pflaumen/Zwetschgen	107,1	-21,6
Wein	41,5	-42,0

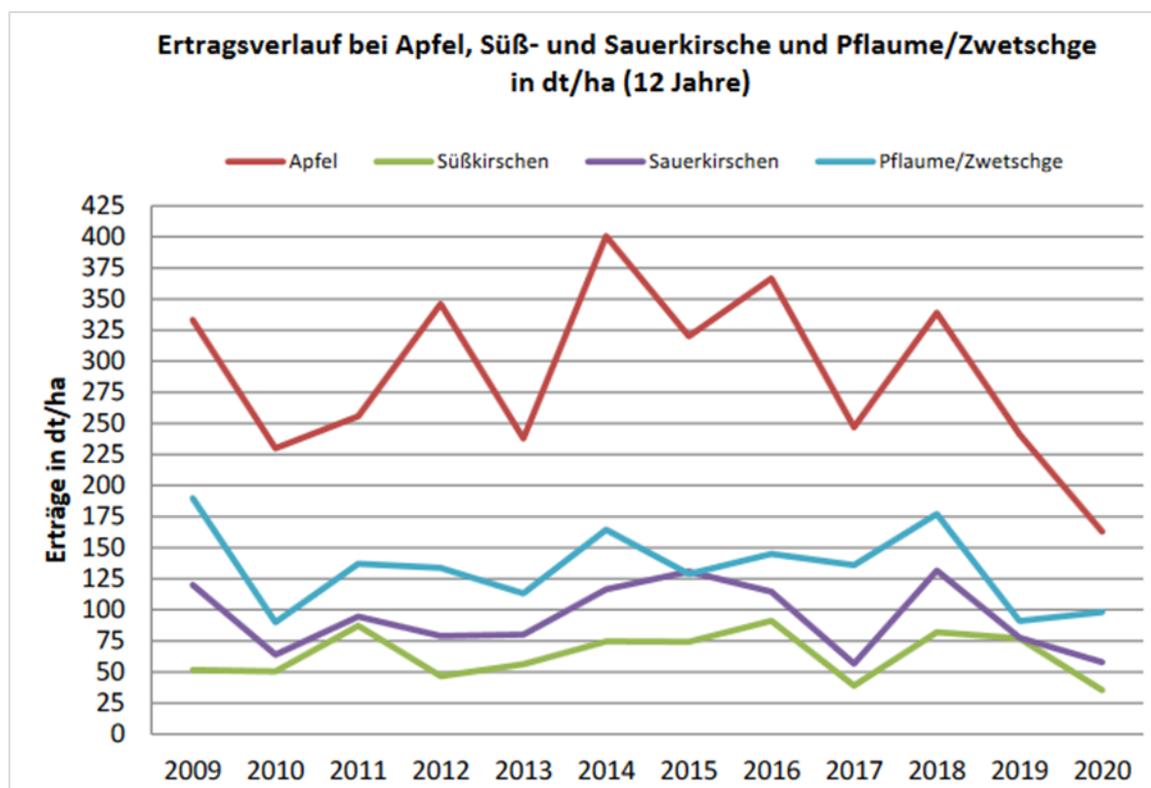


Abbildung 59: Ertragsverlauf der letzten 12 Jahre bei ausgewählten Obstarten (TMIL, 2021).

Im **Getreide** führten Spätfröste im Jahr 2020 bei Wintergerste zu einem Ertragsrückgang um 12 dt/ha (TMIL, 2021). Im Jahr 2021 erschwerten insgesamt die Temperaturen, zeitweise starker Wind und gelegentliche Niederschläge das Wachstum der Ackerkulturen, und in Wintergetreidebeständen war durch die Starkregenereignisse regional starkes Lager zu verzeichnen (TMIL, 2022). Auch **Mais** wies im Jahr 2020 eine gehemmte Jugendentwicklung auf Grund von Spätfrösten auf (TMIL, 2021). Gerade überjährige Kulturen wie Raps oder Winterweizen können in sehr kühlen Wintern auswinterungsgefährdet sein (Diepenbrock et al., 2016). Im

Raps sorgten Herbsttrockenheit 2019, Nachtfröste Ende März / Anfang April 2020 und phytosanitäre Probleme für erhebliche Ertragseinbußen (TMIL, 2021).

Insgesamt betrachtet, „[...] ist mit einer **höheren zeitlichen und räumlichen Variabilität einzelner Wetterereignisse (z.B. Hitze, Trockenheit, Starkniederschläge)** zu rechnen“ (Gömann et. al. 2017, zitiert in Frühauf, 2019). Es wird zu einem weiteren Anstieg der Jahresmitteltemperatur kommen und zu Änderungen der Extreme mit weniger Frost- und Eistagen hin zu mehr Sommertagen und heißen Tagen (Frühauf, 2019). Der Temperaturanstieg wird zu einem früheren Vegetationsbeginn führen. Damit steigt die Gefahr der **irreversiblen Schädigung** durch vereinzelt auftretende **Spätfröste**. Die insgesamt wärmeren Bedingungen können einerseits zu einer früheren Ernte im Herbst führen, aber andererseits auch den Vernalisationsreiz verhindern, welcher bei manchen Kulturen zur Einleitung der Blüte notwendig ist. Starke **Hitzewellen** im Sommer können bei gleichzeitigem, geringem Wasserangebot zu Notreife, früherer Abreife und Sonnenbrand führen. Mitunter kann es zu besseren Überlebenschancen von Schaderregern kommen, da die langen kalten Winter sich verkürzen (Frühauf, 2019). Der Gartenbau mit seinen Sonder- und Dauerkulturen reagiert auf diese klimatischen Veränderungen mit Frostschutzberegnung, Hagelschutz und Zusatzbewässerung. Gegen extreme Hitze und Trockenheit ist aber auch diese Sparte nicht gewappnet. **APV-Anlagen könnten die landwirtschaftlichen Kulturen durch die positiven Auswirkungen auf das Mikroklima langfristig schützen und eine zusätzliche Einkommensquelle für Landwirt*innen generieren.** Einen der Nachteile kann die partielle Schattierung der Kulturen darstellen. Im Folgenden werden bereits gewonnene Erkenntnisse zusammengefasst und lichtlimitierende Einflüsse auf Kulturpflanzen analysiert.

5.3 Schattentoleranz oder der limitierende Faktor Licht

Im Folgenden werden Eigenschaften und Kultur- und Anbauansprüche der Kulturpflanzen in Bezug auf einen Anbau unter APV-Anlagen charakterisiert. Es werden dabei nur hoch- oder leicht-aufgeständerte APV-Anlagen in Betracht gezogen, deren Schattierungsgrad je nach Anlagen- und Modultyp sowie ‚Tracking‘-Einstellung variieren kann. Bei der Pilotanlage APV Resola (s. Kapitel 7.1) liegt der Schattierungsgrad bei 37,5%. Für Anlagen mit Tracking- bzw. Anti-Tracking Funktion oder vertikale Anlagen gelten die Empfehlungen deshalb nicht, Schlüsse zur Tracking-Einstellung können aber gezogen werden.

5.3.1 Schattierungsversuche

Die Produktionsleistung eines Pflanzenbestandes ist abhängig von der Fähigkeit, elektromagnetische Strahlung in organische Verbindungen zu transformieren (Diepenbrock et al., 2016). Auf dieser Grundlage werden die Auswirkungen von Verschattung landwirtschaftlicher und gartenbaulicher Kulturen unter APV-Anlagen auf das Pflanzenwachstum diskutiert. In dem Projekt „Agroforst: Agroforstsysteme mit Mehrwert für Mensch und Umwelt“ wurden vier

Kulturen auf ihre Schattentoleranz getestet, indem oberhalb der Kultur Schattierungsnetze installiert wurden, die die solare Strahlung um „[...] 12 % (*leicht*), 26 % (*mittel*) und 50 % (*stark*) reduzierten“ (Schulz et al., 2016).

Silomais reagierte unterschiedlich stark mit eingeschränktem Höhenwachstum und längeren, dünneren Blättern auf zunehmende Schattierung. Weiterhin verschob sich das Rispen-schieben bei den Varianten mit 50 % Schattierung um 14 Tage. Die Trockenmasse nahm mit zunehmender Schattierung signifikant ab (>20 % bei 50 % Schattierung). In den stark schattierten **Maisparzellen** wurde eine verringerte Temperatur von maximal 18°C (Kontrolle maximal 22°C) und eine erhöhte Bodenfeuchte von 22 % (Kontrolle 17 %) festgestellt.

Bei den untersuchten Wintergetreidearten zeigte sich **Winterweizen** am empfindlichsten. Bei der 50 %igen Schattierung setzte die Druschreife erst 14 Tage später ein, allerdings nur im Versuchsjahr 2016, da die Witterung etwas unbeständiger war. Im selben Jahr unterschieden sich auch die Kornerträge aller Schattierungsvarianten signifikant. Im Jahr 2015 reagierte **Winterweizen** unter der starken Schattierung mit 30 % Ertragsreduktion. Ursächlich hierfür ist die schatteninduzierte Reduktion der Kohlstoffquellen (Blätter) und Kohlenstoffsinken (Ähren) (Schulz et al., 2016). Weiterhin zeigte sich, dass der Rohproteingehalt in beiden Jahren mit zunehmender Beschattung signifikant anstieg. Der **Mykotoxingehalt** auf Grund von Fusariuminfektion stieg im Versuchsjahr 2016 in der Variante mit starker Schattierung enorm an.

Gerste zeigte in einem **einjährigen** Versuch bei einer Reduzierung der Lichtmenge um 50 % einen signifikanten **Ertragsrückgang um 44 %** (Schulz et al., 2016).

Bei der Entwicklung und dem Wachstum der **Kartoffeln** konnten in den Schattierungsvarianten keine Unterschiede festgestellt werden. Auch die Anzahl der Knollen wurde nicht beeinflusst. Ausschließlich im Versuchsjahr 2016 kam es zu einem signifikanten Ertragsrückgang von 46 % bzw. 37 % bei den Varianten ‚mittel‘ und ‚starke‘ Schattierung (Schulz et al., 2016).

Bei dem Projekt APV Resola (s. Kapitel 7.1) wurden Untersuchungen unter einer hoch-aufgeständerten APV-Anlage mit **Kleegras**, **Winterweizen**, **Kartoffeln** und **Sellerie** durchgeführt. Hier wurde ebenso festgestellt, dass der Einfluss der Schattierung auch stark von Wetterschwankungen abhängig ist (Trommsdorff, et al., 2020). Im etwas kühleren, nasserem Jahr 2017 reduzierte sich der Ertrag bei Kleegras um **5,3 %**, bei Sellerie, Weizen und Kartoffeln belief sich der Verlust gegenüber der ungeschatteten Referenzfläche um **18 % bis 19 %**. Die Schattierung unter leicht- bis hoch aufgeständerten APV Anlagen im Ackerbau wäre generell dem Bereich ‚mittel‘ in den Schattierungsversuchen zuzuordnen. Unter APV sind, im Gegensatz zu den reinen Schattierungsversuchen, die im Vergleich zu Schattierungsnetzen anzunehmenden, positiveren Effekte auf Mikroklima und Boden zu berücksichtigen, die einen gegenläufigen Effekt hervorrufen.

So reagierten im heißeren und trockeneren Jahr 2018 **Sellerie** unter APV mit einer Ertragssteigerung um **12 %**, **Kartoffeln** um **11 %** und **Winterweizen** um **3 %** gegenüber der

Referenzfläche ohne APV-Anlage. Nur **Klee gras** zeigte einen geringen Ertragsrückgang, allerdings war der Ertrag um **2,7 %** höher als im Jahr 2017 (Abbildung 60). Eine Betrachtung nur von Verlusten durch Schattierung wäre fehlleitend, da klimabedingte Ertragsverluste, die in den kommenden Jahren laut zahlreicher Prognosen weiter ansteigen werden, durch die APV-Anlagen teilweise ausgeglichen werden oder die Erträge unter APV-Anlagen sogar ansteigen können.

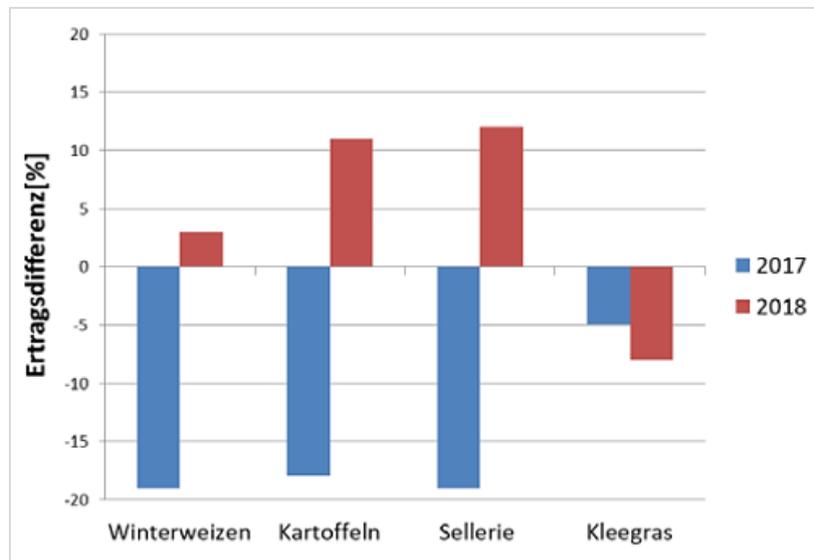


Abbildung 60: Ertragsunterschiede der Kulturen unter APV gegenüber den Referenzflächen im Jahr 2017 (blau) und im Jahr 2018 (rot) in Heggelbach (Trommsdorff, et al., 2020).

5.3.2 Physiologie

Wie eingangs beschrieben, hängt der Ertrag eines Pflanzenbestandes in hohem Maße von der Fähigkeit ab, solare Energie in organische Verbindungen umzuwandeln, also Photosynthese zu betreiben. Hier werden C3-, C4- (räumliche Trennung von CO₂-Fixierung und Calvinzyklus) und CAM-Pflanzen (zeitliche Trennung von CO₂-Fixierung und Calvin-Zyklus) unterschieden. Bei C4-Pflanzen kommt es, im Gegensatz zu C3-Pflanzen, zu einer vorgeschalteten CO₂-Fixierung, die den CO₂-Gehalt im Blatt erhöht (Diepenbrock et al., 2016). Die Lichtsättigung, bei der die maximale Netto-Photosyntheserate erreicht ist, liegt bei C3-Pflanzen zwischen 1.300 und 1.600 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ und bei C4-Pflanzen $\geq 1.600 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$. Als Referenzwert hierzu wird in Mitteleuropa im Sommer gegen Mittag eine PAR (photosynthetisch aktive Strahlung) von 2000 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ angegeben (Diepenbrock et al., 2016).

Ist der Lichtsättigungspunkt erreicht, gleichwohl sich die Lichtintensität weiter erhöht, wird die Photosyntheserate bei C3-Pflanzen nicht weiter gesteigert (Idelberger, 2011). C4-Pflanzen hingegen reagieren auf steigende Lichtintensitäten mit steigenden Photosyntheseraten (Diepenbrock et al., 2016). Weiterhin unterscheiden sich diese Pflanzengruppen in der maximalen Netto-Photosyntheserate. C3-Pflanzen liegen hier bei 20 bis 40 $\mu\text{mol}_{\text{CO}_2}/\text{m}^2\text{s}$ und C4-Pflanzen bei 30 bis 60 $\mu\text{mol}_{\text{CO}_2}/\text{m}^2\text{s}$. Für die **Zuckerrübensorten** ‚Penta‘, Nematop und die

Hybride Stru1915 liegen diese Werte bei 51/46/44 $\mu\text{mol}_{\text{CO}_2}/\text{m}^2\text{s}$ (Girth, 2004), für junge **Weizenpflanzen** bei ca. 20 $\mu\text{mol}_{\text{CO}_2}/\text{m}^2\text{s}$ und bei **Spargel** beispielsweise unter 10 $\mu\text{mol}_{\text{CO}_2}/\text{m}^2\text{s}$ (Schaper, 2008). Dies stützt auch die Behauptung, dass niedrige Photosynthese-, Carboxylierungs- und Elektronentransportraten vor allem bei perennierenden und monokotylen Pflanzenarten zu finden sind (Schaper, 2008).

Bei C4-Pflanzen wie **Mais** liegen das **Temperaturoptimum** und die **Hitzegrenze** bedeutend höher, wohingegen der **Transpirationskoeffizient** vermindert ist (Diepenbrock et al., 2016). So sind sie an Standorte mit hoher Einstrahlung sowie ungünstiger Wasser- und Nährstoffversorgung angepasst, wobei sie bei erhöhter Nährstoffgabe auch mit erhöhter Photosyntheserate reagieren können (Diepenbrock et al., 2016).

Die **Photosyntheserate** wiederum ist generell abhängig von der Sonneinstrahlung und damit von der Intensität, Qualität und Belichtungsdauer, sowie von der Temperatur, dem Kohlenstoffdioxidgehalt der Luft, der Wasserverfügbarkeit, den Nährstoffen, dem Chlorophyllgehalt und von phytosanitären Einflüssen (Idelberger, 2011). Sind die Einstrahlungsstärken zu niedrig, atmet die Pflanze. Die Atmung verringert sich je stärker die Strahlung wird, bis der sogenannte **Lichtkompensationspunkt** erreicht ist (Abbildung 61).

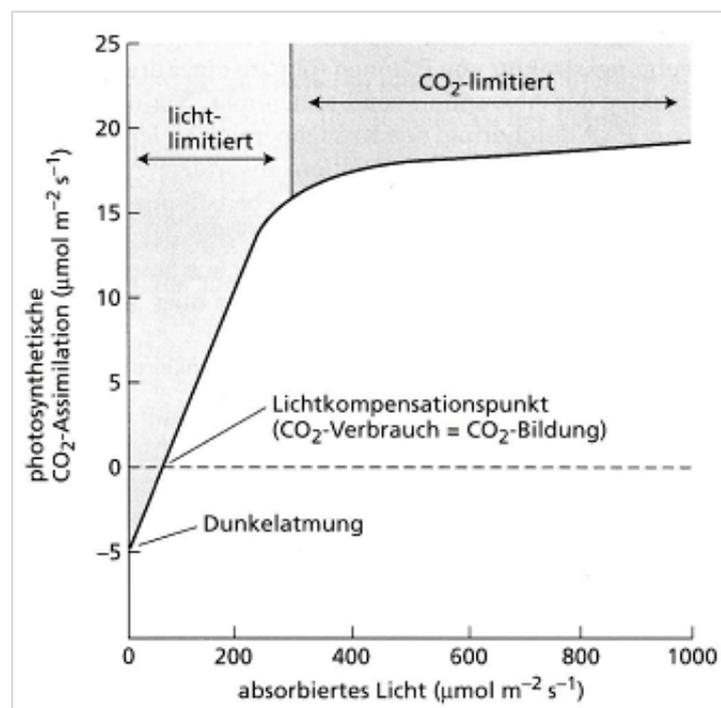


Abbildung 61: Die Abhängigkeit der Photosynthese von der Beleuchtungsstärke in einer C3-Pflanze (Taiz & Zeiger, 2000).

Dieser Punkt liegt bei den stark lichtbedürftigen C4-Pflanzen weit höher als bei C3-Pflanzen. Nach dem Lichtkompensationspunkt erhöht sich die Photosyntheserate bis zum Lichtsättigungspunkt. Steigt die Lichtintensität darüber hinaus an, kann sich die Photosyntheserate absenken bis hin zur **Photoinhibition** (Abbildung 62) (Idelberger, 2011).

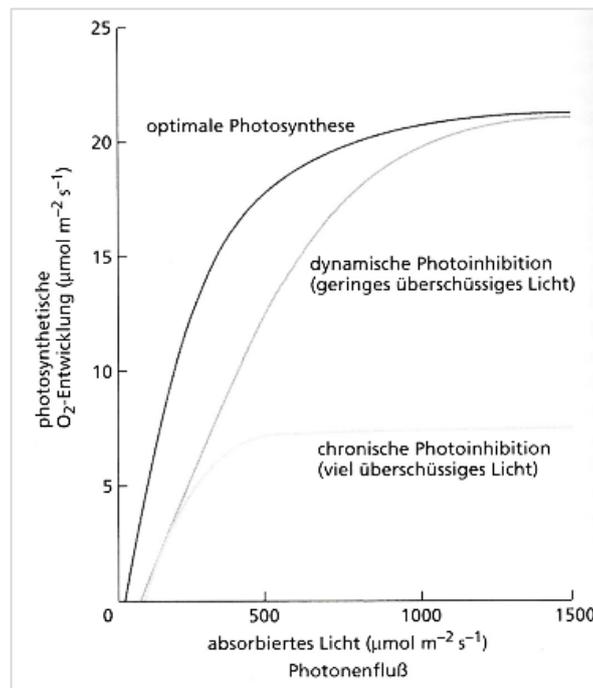


Abbildung 62: Durch Photoinhibition induzierte Änderungen der Lichteffektkurven der Photosynthese (Taiz & Zeiger, 2000).

So werden bei **Strahlungsintensitäten von 800 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$** nur ca. **10 % bis 50 % für die Photosynthese** genutzt, bei höheren Werten kann der Anteil noch geringer werden. Gleich zur Lichtintensität verhält sich die Korrelation zwischen Photosynthese und Temperatur/ CO_2 -Gehalt. **Pflanzen haben** zum einen eine **Hitzegrenze**, aber auch einen **CO_2 -Sättigungspunkt**. Sind diese erreicht, kann die Photosyntheserate (PS-Rate) nicht weiter ansteigen bzw. nimmt sogar ab (Idelberger, 2011).

Weitreichende negative Auswirkungen in Bezug auf die PS-Rate bringen auch Wasser- und Nährstoffmangel, phytosanitäre Aspekte und ein verminderter Chlorophyllgehalt mit sich.

Diese physiologischen Hintergründe zeigen, dass es Unterschiede in der Lichtbedürftigkeit von Kulturen gibt. Bei C4-Pflanzen (bspw. **Mais**) sind die negativen Auswirkungen durch eine Teilschattierung höher als bei C3-Pflanzen. Die Gruppe der C3-Pflanzen reagiert allerdings nicht homogen auf eine Teilschattierung. Hier wird auf das Makroklima verwiesen, welches bei trockenen Verhältnissen zu unterschiedlichen Mehrerträgen bei **Sellerie, Kartoffel und Weizen** führte. **Kleegras** reagierte bei unbeständigem und auch bei trockenem Wetter mit Ertragsrückgang. Es sind neben dem Makroklima auch andere Faktoren relevant (Onaga und Wydra 2016a,b, 2021).

Pflanzen weisen unterschiedliche Netto-Photosyntheseraten auf. Innerhalb der C3-Pflanzen variiert die Geschwindigkeit der PS erheblich: 46 $\mu\text{mol}_{\text{CO}_2}/\text{m}^2\text{s}$ (**Zuckerrübensorte ‚Nematop‘**), 20 $\mu\text{mol}_{\text{CO}_2}/\text{m}^2\text{s}$ (junge **Weizenpflanzen**) und unter 10 $\mu\text{mol}_{\text{CO}_2}/\text{m}^2\text{s}$ (**Spargel** in einem jungen Stadium). **Monoktyle und/oder perennierende** Pflanzenarten weisen im Vergleich mit

dikotylen und/oder einjährigen Pflanzenarten geringere Raten auf. Möglicherweise ist eine geringere Photosyntheserate bei **Kleegrass**, welches standardmäßig aus 2/3 monokotylen, perennierenden Gräsern und nur aus ca. 1/3 aus dikotylen, perennierenden Leguminosen besteht, ursächlich für den Ertragsrückgang unter der Schattierung im APV-Resola Projekt. Anzunehmen ist, dass der Bestand schon im ersten Jahr nicht ausreichende Reserven für das zweite Jahr anlegen konnte und auf Grund des Hitze-/Trockenstresses zusätzlich mit Wachstumsdepressionen reagierte. Dementsprechend ergibt sich folgendes Ranking bezogen auf

- a) Lichtbedürftigkeit: C4-Pflanzen (Mais) > C3-Pflanzen
- b) Positive Auswirkungen der Schattierung bei trockenem, heißen Wetter: Sellerie > Kartoffel > Weizen > Kleegrass
- c) Positive Auswirkungen der Schattierung bei nassem, kühlerem Wetter: Kleegrass > Sellerie, Kartoffeln, Weizen
- d) Netto-Photosyntheserate: Mais > Zuckerrübe > Weizen > Spargel bzw. Dikotyle > Monokotyle.

5.3.3 Morphologie

Weiterhin sind auch morphologische Merkmale relevant. Hier wäre der **Blattflächenindex** (BFI) auf einer Skala von 0 (keine Blätter, Nadeln) bis 16 zu nennen. Dieser beschreibt die zur PS befähigte Blattfläche in einem Bestand auf die Bodenfläche bezogen (Diepenbrock et al., 2016). Dieser BFI wird bei den meisten, voll entwickelten Pflanzen mit 3 bis 4 beziffert. Allerdings kann dieser BFI innerhalb der Vegetationsperiode erheblich variieren. **Raps** kann einen BFI von 3 bis 3,5 vor dem Winter haben. Im Winter kann dieser sich bei ungünstigen Bedingungen bis auf 0,5 reduzieren und dann in der nachwinterlichen Vegetationsperiode wieder auf 3-4 ansteigen (Diepenbrock et al., 2016). Der BFI steht natürlich auch in Abhängigkeit zur Blattgröße, aber auch zur Blattanzahl.

In **Zuckerrübenbeständen** sind 60 Blätter pro Einzelpflanze, sowie ein BFI über 4 nicht unüblich, wobei dann die unteren Blätter beginnen abzusterben (Diepenbrock et al., 2016). Hier ist natürlich die Ausnutzung des Lichts wesentlich besser gegeben als bei Kulturen mit niedrigem BFI. Möglicherweise können Pflanzen mit hohem BFI bzw. hoher Blattanzahl geringere Strahlungsintensitäten beispielsweise durch eine Teilschattierung durch APV-Anlagen besser kompensieren, als Pflanzen, denen generell wenig zur Photosynthese befähigte Fläche zur Verfügung steht.

Gegenüber stehen sich hier:

- großblättrige Kulturen wie: **Zuckerrübe, Sellerie, Kartoffel**, denen eine höhere Schattentoleranz zugesprochen werden kann,
- Pflanzen mit mittleren Blattgrößen und -zahlen, wie **Hanf, Mais, Raps, Sonnenblumen** und
- kleinblättrigen Kulturen wie **Ackerbohne, Körnererbse, Öllein, Getreidearten und Futterpflanzen** mit einer geringeren Schattentoleranz bezüglich des BFIs.

5.3.4 Ertragsbildung und Assimilateverteilung

Aus der Photosynthese heraus entstehen Assimilate, die die Pflanze unterschiedlich in ihre Speicherorgane verteilen und einlagern kann. Diese Speicherorgane entsprechen dem verwendeten Erntegut. So werden im landwirtschaftlichen Bereich die **Körnerfrüchte** (Getreidearten, Ölfrüchte, Körnerleguminosen), **Rohstoff- oder Energiepflanzen, Futterpflanzen** sowie die **Wurzel- und Knollenfrüchte** unterschieden (Diepenbrock et al., 2016). Letztere können erhebliche Mengen Wasser und Kohlenhydrate vor dem Einsetzen der Blüte in die Blätter, sowie Wurzeln und Knollen einlagern und somit den Ernteertrag sichern. Die Reifezeit von **Kartoffeln** beispielsweise kann sich zwischen 90 und 160 Tagen belaufen (BZL, 2020). In dieser Zeitspanne kann die Pflanze Photosynthese betreiben und Assimilate bilden, die die Ernteorgane wachsen lassen. Bei Pflanzen aus der Kategorie **Wurzel- und Knollenfrüchte** ist deshalb davon auszugehen, dass sich eine **Reduzierung der PAR um 30 % weniger stark auf den Ertrag** auswirkt. Die Zeitspanne, in der sich die Pflanze entwickeln kann, ist lang genug, um einerseits mehr Blattmasse auf Grund der schattierenden Wirkung zu bilden und andererseits noch entsprechend viel Assimilate in die Knollen und Wurzel einlagern zu können.

Körnerfrüchte hingegen beginnen ihre Assimilateverteilung erst nach der Blüte und verfügen nicht über Speicherorgane im Wurzel-/Sprossbereich. Sie lagern ihre Assimilate an unterschiedlichen Stellen in der Pflanze ein. **Körnerfrüchte** unterscheiden sich in:

- terminierte Arten (Gräser und Getreide), die ihre Assimilate in die reproduktiven Organe befördern,
- semi-terminierte Arten (Raps), deren Stoffverteilung der „sink“- Differenzierung folgt, sowohl generative als auch vegetative Organe je nach „sink“ können versorgt werden und
- nicht-terminierte Arten (Ackerbohne), welche ihre Assimilate gleichmäßig in alle Organe verteilen (Diepenbrock, 2016).

Somit müssen den **Körnerfrüchten** nach der Blüte alle notwendigen Ressourcen wie Licht und CO₂ beispielsweise in ausreichendem Maß zur Verfügung stehen, um akzeptable

Kornerträge zu bilden. **Ist der Faktor Licht hier limitierend, kann dies zu weitaus geringeren Kornerträgen führen.** Bei **Weizen** beispielsweise beläuft sich die Phase der Kornfüllung nur auf 4 Wochen (Yara, 2021). Das Fahnenblatt stellt 70 % der Kohlenhydrate zur Verfügung, die es nur bilden kann, wenn der Faktor Licht nicht limitierend ist.

Hierzu kann noch der Ernteindex zu Rate gezogen werden, der den Anteil des Ernteguts an der gesamten Biomasse (Diepenbrock et al., 2016) beschreibt. **Winterweizen** hat einen Ernteindex von 0,55, bei **Futterleguminose** (als Ganzpflanze) wird der Wert mit 1 beziffert, bei **Raps** mit 0,38; bei **Zuckerrübe** mit 0,59, bei **Kartoffel** mit 0,83, bei **Öllein** mit 0,40, bei **Sonnenblume** mit 0,33 und bei **Hanf** mit 1 (Jacobs, et al., 2018). **Rohstoff- oder Energiepflanzen, sowie Futterpflanzen**, die komplett geerntet werden, weisen einen Index von 1 auf, Pflanzen bei denen nicht alle Pflanzenteile als Ertrag gelten, sind entsprechend niedriger eingestuft.

An dieser Stelle lässt sich ein Hinweis auf den In- und Output der Kulturen geben. Der Input ist entsprechend höher bei Pflanzen, wie **Raps oder Sonnenblume**, da nur 1/3 der Pflanze als Ertrag gilt, gleichwohl die komplette Pflanze ausreichend mit Wasser, Nährstoffen, Licht etc. versorgt werden muss. Erschwerend kommt hinzu, dass die Einlagerung der Assimilate nur in einem kurzen Zeitraum nach der Blüte erfolgt. Dementsprechend könnte eine Schattierung in dieser sensiblen Zeit erhebliche Auswirkungen auf den Ertrag sowie den Gewinn mit sich bringen. Dies ist aber immer abhängig von den anderen begrenzenden Faktoren, die in Zeiten des Klimawandels überwiegen können.

Hieraus ergibt sich folgendes Ranking bezogen auf die Auswirkungen der Schattierung auf verschiedene Parameter:

- a) Speichervermögen (hoch) von Assimilaten:
Wurzel- und Knollenfrüchte > Energie-/Futterpflanzen (Leguminosen, Mais) > Körnerpflanzen (Getreide, Raps, Lein bspw.)
- b) Assimilatebedarf (hoch) in Bezug zur Verfügung stehender Zeit:
Körnerfrüchte > Energie-/Futterpflanzen, Wurzel- und Knollenfrüchte
- c) Ernteindex (hoch):
Energie-/Futterpflanzen (Mais, Hanf, Leguminosen, Futtergräser) > Kartoffel > Zuckerrübe > Weizen > Öllein > Raps > Sonnenblume.

Zusammenfassend ergeben sich unterschiedliche Kriterien, nach denen die Fähigkeit von gartenbaulichen und landwirtschaftlichen Kulturen, Schatten zu tolerieren, beurteilt werden kann. Einige sind exemplarisch und in Anlehnung an die vorangegangenen Ausführungen in Abbildung 63 dargestellt.

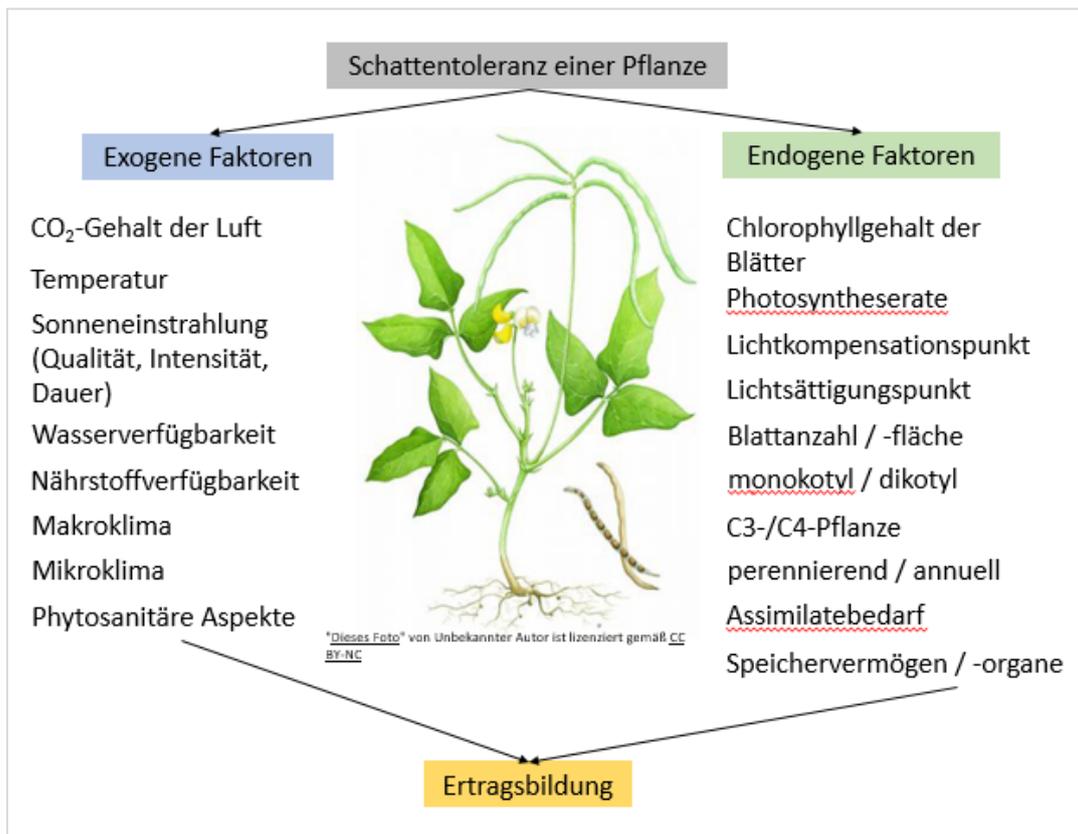


Abbildung 63: Kriterien für die Schattentoleranz von gartenbaulichen und landwirtschaftlichen Kulturen (eigene Darstellung).

5.4 Anbau und Kulturführung der Pflanzen mit Bezug zu APV-Anlagen

Ob eine landwirtschaftliche Kultur für den Anbau unter APV-Anlagen geeignet ist, hängt von unterschiedlichen Faktoren ab:

- der eingesetzten APV-Technik
- den klimatischen Verhältnissen am Agrarstandort
- der Schattentoleranz der Kultur
- der Ertragsbildung
- sowie dem Anbaumanagement.

Die Ansprüche an den Boden und die **Wasservorräte** sind von Kultur zu Kultur unterschiedlich. **Da APV-Anlagen nach fast allen bisherigen Untersuchungen einen positiven Einfluss auf die Wasserbilanz haben, wird im Folgenden auf die Trockenheitstoleranz der Kulturpflanzen und damit ihre zu erwartende positive Reaktion bezüglich ihrer Wasserversorgung unter einer APV-Anlage eingegangen.**

Zur Abschätzung der Fragen des **Wasserhaushaltes** und der Pflanzenbedeckung (Foken et al., 2021), und damit des Risikos durch Trockenheit und des **Erosionsrisikos** sind Kenntnisse zum Anbau der jeweiligen Kultur, insbesondere zu Aussaat- oder Pflanzzeitpunkt, zur

Bodenbedeckung, aber auch zur Bodenbearbeitung ausschlaggebend (Fiener & Wilken, 2021). Insbesondere die Koinzidenz von Frühjahrstrockenheit, vegetationsloser Boden und Starkregenereignis stellt eine hohe Erosionsgefahr dar, und dies insbesondere im Energiepflanzenanbau mit Mais (Abbildung 64, s.a. Abbildung 11). Diese besonderen Risiken stellen Gründe für die **Installation einer APV-Anlage zum Schutz** dar, wie zum Schutz vor Trockenheit, oder zum Erosionsschutz (Wind, Wasser), hier auch in Verbindung mit speziellen Vorkehrungen zur Verhinderung des einseitigen Abströmens von Starkregen von den Modulen (s. Kapitel 3.4).

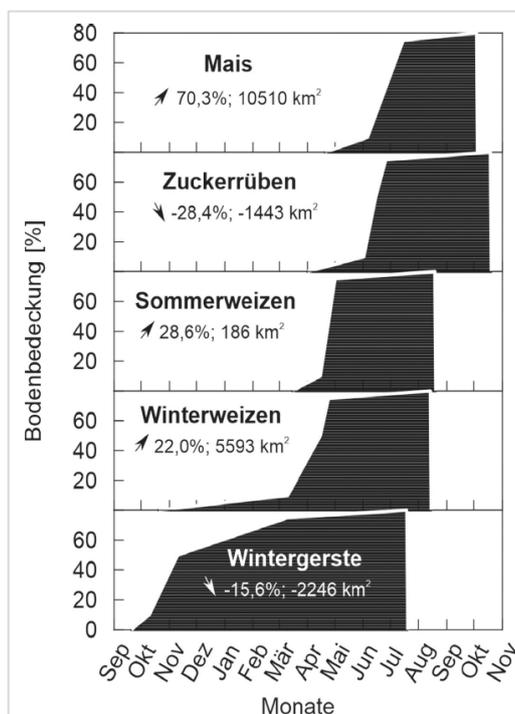


Abbildung 64: Typische Entwicklung der Bodenbedeckung durch verschiedene Ackerfrüchte in Mitteleuropa (Schwertmann et al., 1990); Prozent- und Absolutwerte (km²) geben die mittlere Ab- bzw. Zunahme der Anbaufläche der jeweiligen Ackerfrüchte in der BRD zwischen den Zeiträumen 1991-2000 und 2012-2017 an (Destatis, 2021).

5.4.1 Anbaumanagement landwirtschaftlicher Kulturen

Die Aussaat und Pflanzung von landwirtschaftlichen Kulturen liegen mehrheitlich in den Frühjahrs- und Herbstmonaten. Tabelle 6 zeigt die Aussaat-/Pflanzmonate der in Thüringen angebauten Kulturen. Zu beachten ist hier die in den letzten Jahren zu beobachtende Frühjahrstrockenheit, sowie Spätfröste, die in die Blütezeit fallen können – Faktoren, für die eine APV-Anlage schadensbegrenzend sein kann. Verschiedene im Folgenden aufgeführte Faktoren haben Einfluss auf die Eignung für den Anbau unter APV-Anlagen, bzw. auch für den Bedarf von Schutz durch APV unter Klimastressbedingungen für die Pflanzen.

Tabelle 6: Landwirtschaftliche Kulturen und entsprechende Pflanzmonate (eigene Darstellung).

Kultur	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Getreide Winterungen												
Getreide Sommerungen												
Pflanzen zur Grünernte												
Hackfrüchte												
Hülsenfrüchte												
Ölpflanzen												
Hanf												

Der **Winterroggen** stellt die geringsten Ansprüche an Boden und Wasserverfügbarkeit. Weiterhin ist dieser auch am winterhärtesten (Jentsch, et al., 2016). **Wintergerste** benötigt eine ausreichende Nährstoffversorgung, sowie ein stabiles Klima. Sie ist stark auswinterungsgefährdet. Auf Grund des schnellen Wachstums im Herbst, ist sie gegen Frühjahrestrockenheit unempfindlich (Farack et al., 2013). **Winterweizen** ist die anspruchsvollste Kultur unter den Winterungen. Wichtig sind auf Grund der langen Vegetationszeit eine feine Bodengare, ausreichende Nährstoffversorgung und Wasserverfügbarkeit. Der **Sommergerste** reichen Standorte mit Bodenpunkten über 30. Allerdings sollte in den letzten zwei bis drei Vegetationswochen ausreichend Wasser zur Verfügung stehen (Farack et al., 2011).

Mais stellt hohe Ansprüche an die Struktur des Bodens, da diese die Durchwurzelung und die Versorgung mit Wasser und Nährstoffen garantiert (Peyker et al., 2013). Auch auf Hanglagen und auf erosionsgefährdeten Böden ist auf Grund des späten Bestandsschlusses vom Maisanbau generell abzuraten. **Ackergräser** sind im Verhältnis anspruchsloser, so können sie beispielsweise auf Hanglagen und staunassen Standorten problemlos angebaut werden (Diepenbrock et al., 2016). Der Anbau von **Leguminosen** sollte auf frischen und futterwüchsigen Lagen erfolgen (Peyker et al., 2016); Lagen mit einem Jahresniederschlag von über 600 mm sind zu präferieren, Böden mit niedrigem pH-Wert, sowie vernässte Standorte sind zu meiden (Peyker et al., 2016).

Kartoffeln sollten nicht auf verdichteten, steinhaltigen und schwer tonigen Böden angebaut werden. Außerdem muss der Boden vor allem zur Erntezeit unabhängig von der Witterung siebfähig sein. Wichtig ist der Temperatur- und Niederschlagsverlauf, da die Knollen bereits zwischen -1°C bis -2°C und das Kraut zwischen $-1,5^{\circ}\text{C}$ und $-1,7^{\circ}\text{C}$ absterben (Diepenbrock,

et al., 2016). Somit können Spätfröste nach der Pflanzung erheblichen Schaden verursachen. Mit Beginn der Blüte muss die Wasserverfügbarkeit zur Ausbildung und Stärkeeinlagerung der Knollen gegeben sein (Diepenbrock et al., 2016). **Zuckerrüben** sollten auf mittelschweren und tiefgründigen Böden angebaut werden. Zudem sind eine hohe, nutzbare Feldkapazität und ein stabiles Bodengefüge günstig (Südzucker-AG & TLL, 2008). Auf Böden mit einer Bodenwertzahl > 60 werden 500 mm Niederschlag benötigt (Südzucker-AG & TLL, 2008) .

Für den Anbau von **Körnererbsen** sind Sand- und Tonböden und verdichtete, saure oder staunasse Böden ungeeignet. Sie gedeihen auf humosen, tiefgründigen Böden oder lehmigen Sanden (Guddat, et al., 2006). Weiterhin sollte zur Keimung und zur Blüte ausreichend Wasser vorhanden sein. Die Bodenoberfläche sollte steinfrei und eben sein, um den Mähdrusch verlustarm vollziehen zu können. Die **Ackerbohne** ist bezüglich beider Kriterien etwas anspruchsvoller. Flachgründige, sandige Böden sind zu meiden. Bei ausreichenden Niederschlagsmengen könnten auch lehmige Sande zum Anbau in Erwägung gezogen werden. Staunasse und verdichtete Böden kommen nicht in Frage. Die Ackerbohne benötigt über die gesamte Vegetationsperiode ausreichend Wasser, besonders zur Blüte und in der Zeit des Hülsenansatzes.

Raps stellt vor allem an den Wasserbedarf hohe Ansprüche. So benötigt er eine durchschnittliche Niederschlagsmenge von 600 mm (Graf et al., 2013). Es eignen sich gut versorgte schwere bis tonige Lehmböden sowie humose Sande (Graf et al., 2013). **Sonnenblumen** benötigen Wärmesummen von 1.500 ° C und eine mittlere Niederschlagsmenge von 350 bis 400 mm (Graf et al., 2006). Weiterhin sind anhaltende Trockenperioden für die erfolgreiche Abreife im Spätsommer notwendig (Graf et al., 2006). **Öllein** ist noch anspruchsvoller, was die Wärmebedürftigkeit betrifft. Hier sind Standorte mit Wärmesummen von 1.600 bis 1.800° C zu bevorzugen. Staunasse und verschlammungsgefährdete Böden sind zu vermeiden. Besonders eignen sich Lössstandorte, tiefgründige Lehme bzw. sandige Lehme (Graf et al., 2001).

Für den **Hanfanbau** eignen sich Lössstandorte, tiefgründige lehmige Sande und sandige Lehme. Diese sollten gut durchwurzelbar sein, damit der Hanf in tiefere Schichten vordringen kann. Vor allem in den Monaten Mai bis Juni ist ein hohes Wasserangebot entscheidend (Graf et al., 2005).

5.4.2 Agrartechnik und Zusatzbewässerung in der Landwirtschaft

Bodenbearbeitung: Zur Bodenbearbeitung stehen unterschiedliche Geräte zur Verfügung, die entweder einzeln oder auch kombiniert angewendet werden können. Der Unterboden wird mit Tiefenlockerern und der Oberboden mit Walzen, Schleppen, Eggen, Grubbern, Scheibengeräten und Pflügen bearbeitet (Diepenbrock et al., 2016). Die Aussaat erfolgt mit Drillmaschinen, die Pflanzung mit entsprechenden Pflanzmaschinen.

Beikrautregulierung: Es wird zwischen mechanischen, thermischen und chemischen Verfahren unterschieden. Bei ersteren kommen Striegel, Rollhacken, Hacke oder Eggen zum

Einsatz. Die thermische Bekämpfung wird mit Abflammgeräten oder Infrarotstrahlern durchgeführt, die chemische Behandlung mit Feldspritzen (Diepenbrock et al., 2016).

Zusatzberegnung und Düngung: Eine Zusatzbewässerung als Kompensationsstrategie von Trockenperioden kann auch bei landwirtschaftlichen Kulturen sinnvoll bzw. notwendig sein. Hier wird mit mobilen Beregnungsmaschinen mit Großflächenregnern oder Düsenwagen, sowie mit Kreis- und Linearberegnungsmaschinen ab einer Fläche von 25 ha gearbeitet.

Im **Kartoffelanbau** ist unter den in Thüringen vorherrschenden, durchschnittlichen Niederschlagsmengen von 470 mm bis 570 mm, eine Zusatzbewässerung zwingend notwendig. Hier kommen sowohl Großflächenregner als auch Tröpfchenbewässerung mit Fertigation zum Einsatz (Wölfel, et al., 2010).

Sonnenblumen bspw. werden als nicht beregnungsbedürftig eingestuft (Graf et al., 2006). Um die landwirtschaftlichen Kulturen auch während der Vegetationsphase ausreichend mit Nährstoffen zu versorgen, kommen Düngerstreuer, Injektions- und Gülleschlitzgeräte zum Einsatz.

Ernte: Die Geräte zur Ernte werden nach dem Erntegut differenziert. Bei oberirdischen Ernteorganen ist die Nutzung von Mähdreschern, Feldhäckslern, Schwadmähern, Rundballenpressen, Ladewagen und Köpfladern möglich. Unterirdische Ernteorgane werden mit dem Rode-trennlader, Rodeköpflader oder Rodelader geerntet (Diepenbrock et al., 2016). Die Arbeitsbreiten landwirtschaftlicher Maschinen sind in Tabelle 7 dargestellt.

Tabelle 7: Landmaschinen und entsprechende Arbeitsbreiten [m] (eigene Darstellung).

Gerät	Arbeitsbreite [m]	Firma
Pflug	0,85 – 1,02 je Schar (bis zu 9 und größer möglich)	Amazone
Kompaktscheibenegge	2,50 - 12	Amazone
Anbau-/Anhängegrubber	3 – 7	Amazone
Kreiselgrubber	2,5 – 4	Amazone
Walze	3 – 6	Voga
Hacke	bis 9	Amazone
Feldspritzen	12 – 49	Amazone
Striegel	1,5 – 27	Hatzenbichler
Abflammer	1,5 – 9	Envo-Dan
Sämaschinen	2,5 – 15	Amazone
Pflanzmaschine	3	Grimme
Anbaustreuer	Bis 18 / bis 36	Amazone
Dammformer	3	Grimme
Mähdrescher	4 – 12	Claas
Feldhäcksler	2,62 – 7,45	Claas
Ballenpresse	3	Claas
Rübenernter	3	Ropa Maschinenbau
Kartoffelernter	2	Grimme

5.4.3 Anbaumanagement gemüsebaulicher Kulturen

Anbau: In Thüringen wurde im Jahr 2020 Gemüse auf **722 ha im Freiland** und auf **33,8 ha** unter **Schutzabdeckungen** einschließlich Gewächshäusern produziert (TLS, 2021). Blatt- und Stängelgemüse nahmen mit 353,8 ha 49 % der Anbaufläche ein, wobei die bedeutendste Kultur hier der **Spargel mit 266,5 ha** (im Ertrag) ist. Die Kohlgemüsearten wurden auf 197,8 ha produziert. Besonders hervorzuheben ist der Weißkohl mit 108,9 ha und der Blumenkohl mit 57,6 ha. Auf 132,0 ha wurden Wurzel- und Knollengemüse produziert. Die wichtigste Kultur in diesem Bereich ist die Speisezwiebel, die auf 121,5 ha also 92 % der Fläche angebaut wurden ist. Es schließen sich die Fruchtgemüse mit 27,3 ha an, wobei allein 10,3 ha auf den Speisekürbis entfallen. Hülsenfrüchte wurden auf 6,3 ha und andere Gemüsearten auf 5,3 ha

angebaut. Im geschützten Anbau wurden 33,79 ha bepflanzt, mehrheitlich mit Tomate auf 25,53 ha (TLS, 2021).

Die nachstehende Tabelle 8 zeigt die Gemüsearten und deren Anbauzeiten. Gemüsekulturen werden in der Regel in mehreren Sätzen angebaut.

Tabelle 8: Gemüsearten und ihre Anbauzeiten. Grün: Aussaatzeit, blau: Pflanzzeit (eigene Darstellung).

Gemüseart	Januar	Februar	März	April	Mai	Juni	Juli	August	September	Oktober	November	Dezember
Kohlgemüse												
Blattgemüse												
Stängelgemüse												
Wurzelgemüse												
Knollengemüse												
Fruchtgemüse												
Hülsengemüse												

Die Ansprüche an den Boden und die Wasserversorgung sind im Wesentlichen höher als bei landwirtschaftlichen Kulturen. In Abhängigkeit zum **Nährstoffbedarf** sind zu unterscheiden:

- Starkzehrer: Blumenkohl, Brokkoli, Kopfkohl, Rosenkohl, Stangensellerie
- Mittelzehrer: Fenchel, Gurke, Kohlrabi, Chinakohl u. a. Kohlarten, Kürbis, Mangold, Porree, Rettich, Rote Rüben, Rucola, Salate, Knollensellerie, Spinat, Zuckermais
- Schwachzehrer: Bohnen, Chicorée, Erbsen, Feldsalat, Knoblauch, Möhren, Pastinaken, Radieschen, Schwarzwurzeln, Wurzelpetersilie und Zwiebeln (Beck & al., 2017).

Entsprechend der unterschiedlichen Wurzelhorizonte der Gemüsekulturen müssen die Böden gut durchwurzelbar sein und über eine ausreichende Wasserhaltefähigkeit verfügen.

5.4.4 Agrartechnik und Zusatzbewässerung im Gartenbau

Je nach Größe des Schrages kommen ähnliche Geräte, allerdings in etwas kleinerer Ausführung als bei den landwirtschaftlichen Kulturen zum Einsatz. Bei den Bodenbearbeitungsgeräten ist noch die Beetfräse zu nennen. Die Ernte erfolgt meistens per Hand, wobei bei Möhren der Möhrenroder und bei Kohl der Kohlroder zum Einsatz kommen. In Abhängigkeit von der Schlaggröße und der Empfindlichkeit des Ernteguts kommen unterschiedliche

Bewässerungssysteme zum Einsatz, wie Kreis- und Linearberegnungsmaschinen, aber auch Gießwagen, Reihenregner und Tröpfchenbewässerung.

5.4.5 Anbaumanagement von obstbaulichen Kulturen

In Thüringen wurden 2020 auf **1.681,7 ha Markto Obst** produziert (TLS, 2020). Auf 60,9 % der Fläche wurden **Äpfel**, auf 1,12 % **Birnen**, auf 16,28 % **Süßkirschen**, auf 11,09 % **Sauerkirschen**, auf 9,26 % **Pflaumen** und **Zwetschgen** sowie auf 1,34 % **Mirabellen** und **Reneklo-den** angebaut. Im Jahr 2020 wurden von 17 Betrieben, davon 6 bio-zertifiziert, **Strauchbeeren** auf 111 ha angebaut (TLS, 2021). In Thüringen stehen derzeit auf 67,2 % der Anbaufläche **schwarzer Holunder**, auf 20,1 % **schwarze Johannisbeeren**, auf 4,5 % sonstige Strauchbeeren, auf 3,2 % **Himbeeren**, auf 3,0 % **rote und weiße Johannisbeeren** sowie auf 2,0 % **Stachelbeeren**. **Erdbeeren** wurden auf einer Fläche von 176,5 ha angebaut (TLS, 2021).

Pflanzsystem: Im **Apfelanbau** wird die Einzelreihe mit Pflanzdichten von 3000 – 4000 Bäumen je Hektar bepflanzt (Thomann & Lang, 2008). Der Abstand in der Reihe beträgt 1 m und der Abstand der Reihen 3 m. Der Trend geht zu kompakteren Wuchsformen, sodass im Erwerbsgartenbau die Spindelerziehung mit einem Kronenansatz bei 40 cm – 60 cm Einzug gehalten hat (Deter, 2018). Die Bäume benötigen für das Wachstum ein **Stützgerüst**, welches in der Regel mit einer Firsthöhe von **4 m** erstellt wird, um gleichzeitig auch die Montage eines **Hagelschutznetzes** zu ermöglichen (Thomann & Lang, 2008).

Im **Birnenanbau** wird ebenso in Einzelreihe gepflanzt, aber nur mit Pflanzdichten von etwa 2050 Bäumen (Steinbauer, 2021). Der Pflanzabstand beträgt 1,25 m und der Abstand der Reihen 3,5 m. Auch hier wird eine sehr schlanke Spindel erzogen mit Baumhöhen von **3 – 3,5 m**, die ein **Stützgerüst von 4 m** notwendig machen. Besonders beim Birnenanbau sind die Ansprüche an das Klima und den Boden hoch. Die **Birne** präferiert ein warmes Klima, mit wenigen Temperatur-Extrema im Winter. Nicht nach Süden ausgerichtete Hanglagen sind wegen des späteren Austriebs und der Minimierung von Blütenfrost als Standort auszuwählen. Die Böden sollten sich zügig erwärmen und über einen guten Wasserhaushalt ohne staunasse Perioden verfügen (Steinbauer, 2021).

Auch **Süß- und Sauerkirschen** werden in Einzelreihe mit Pflanzdichten von 570 – 800 Bäume je Hektar gepflanzt. Es kommen kleinkronige Wuchstypen zum Einsatz mit einem Pflanzabstand von 2,5 m -3,5 m und einem Reihenabstand von 4,5 m (Trapp, 2020). Die Wuchshöhe liegt in etwa bei **4 m**. **Süßkirschen** haben ähnlich hohe Ansprüche an den Boden und den Wasserhaushalt wie Äpfel. **Sauerkirschen** hingegen kommen auch mit Trockenheit vergleichsweise besser zurecht (Pfeiffer, 2020). Im Kirschanbau kommen teilweise auch **Regendächer** zum Einsatz, sowie **Netze** gegen Vogelfraß und den Befall durch die Kirschessigfliege und Kirschfruchtfliege (Trapp, 2020).

Bei **Pflaumen und Zwetschgen** herrschen in Deutschland drei Kronenformen vor, die unterschieden werden nach:

- Spindel, mit Baumhöhen von 2,5 m - 3,5 m, Reihenabständen von 3,5 m und 4,5 m, Baumabständen mit 1,5 m – 3 m und Pflanzdichten von 740 – 1900 Bäume je Hektar,
- die Flachkrone mit Baumhöhen von 2,0 m – 2,5 m, Reihenabständen von 5 m, Baumabstände mit 3,5 m – 4 m und Pflanzdichten von 500 – 570 Bäumen je Hektar
- und die Pfälzer Hecke, welche an einem Gerüst von 1,6 m in Reihenabständen von 4 m - 4,5 m mit Baumabständen von 2,0 m – 2,5 m kultiviert wird (Hortipendium, 2012).

Die Bäume stehen auch in Einzelreihen und bevorzugen ein mildes Klima mit hohen Lichtintensitäten zur Ausreifung.

Im Strauchbeerenanbau kommt dem **Holunder** flächenmäßig die größte Bedeutung zu. In einem Holunder-Versuch wurden die Holunderbäume in Einzelreihe mit Baumabständen von 5,25 m und Reihenabständen von 3,5 m gepflanzt, was einer Pflanzdichte von 540 Bäumen je Hektar entspricht. Die Baumhöhen beliefen sich auf **3,50 m - 4,50 m** (Höhne, 2005). Generell sind im Strauchbeerenanbau vollsonnige und vor starken Winden bzw. Spätfrösten geschützte Lagen geeignet. Im **Himbeeranbau** muss auf leichte bis mittelschwere Böden, durchlässige Böden geachtet werden. **Heidelbeeren** benötigen saure, humose und leichte Böden. Die restlichen Beerenarten sind eher anspruchslos, was die Bodenqualität betrifft (Schmid, 2010). Kultiviert werden die Beeren in Strauchstreifensystemen mit oder ohne Damm. In diesen Systemen stehen sie ein- bis mehrreihig in Reihenabständen von 2,5 m – 3 m. **Himbeeren und Heidelbeeren gelten als schattenverträglich.**

Der Anbau von **Erdbeeren** wird in unterschiedlichen Systemen praktiziert. Zum Teil wird ebenerdig produziert mit Reihenabständen von 0,4 m und Pflanzabständen von 0,25 m – 0,3 m (LWG, 2014). Ein weiteres Verfahren ist die Dammkultur, die entweder einreihig oder doppelreihig vollzogen wird. Teilweise wird auch schon die Stellagenkultur mit Substrat praktiziert (Hoeffelner, 2017).

5.4.6 Agrartechnik und Zusatzbewässerung

Je nach Größe des Schlages kommen ähnliche Geräte, allerdings in etwas kleinerer Ausführung als bei den landwirtschaftlichen Kulturen zum Einsatz. Bei den Bodenbearbeitungsgeräten ist auch hier noch die Beetfräse zu nennen. Die Ernte erfolgt ausschließlich per Hand. In Abhängigkeit von der Schlaggröße und der Empfindlichkeit des Ernteguts kommen unterschiedliche Bewässerungssysteme zum Einsatz. Gängig ist hier die Tröpfchenbewässerung. Zum Teil wird auch die Überkopfbewässerung verwendet, als ‚sinnvolle‘ Maßnahme gegen Spätfröste. Im Obstbau wird zusätzlich mit **Überdachungen** in Form von **Hagelschutznetzen** oder **Regendächern** gearbeitet, um die Früchte vor mechanischen Einwirkungen zu schützen.

5.5 Eignung der landwirtschaftlichen Kulturen in Thüringen mit Fokus auf ihre Schattentoleranz

5.5.1 Monokotyle Arten – Getreide

Forschungsergebnisse: Im **Forschungsprojekt APV-Resola** wurden in einer APV-Pilotanlage neben Bestandsentwicklung, Ertrag und Ertragsqualität auch mikroklimatische Bedingungen untersucht. Die photosynthetisch aktive Sonneneinstrahlung war unter der Anlage um 30 % geringer als im Freiland, wodurch **Weizen** vor allem im kühleren, feuchten Versuchsjahr mit einer Ertragsdepression von 18 % reagierte. Auch bei Dinkel sind Ertragsdefizite zu erwarten (Oberfell et al., 2013). Roggen und Hafer (Beck et al., 2012) sowie Gerste und Buchweizen (Oberfell et al., 2013) werden als Getreidearten eingestuft, die nicht von APV-Systemen beeinflusst werden. In einem Schattierungsversuch reagierte Gerste nur schwach auf eine Reduktion der PAR um 26 % mit Ertragsverlusten, aber mit 28 % Verlusten auf eine Reduktion der PAR um 50 % (Abbildung 65). Das würde generell eine Eignung für Anbau unter APV-Anlagen mit maximal 30 % Verschattung bedeuten.

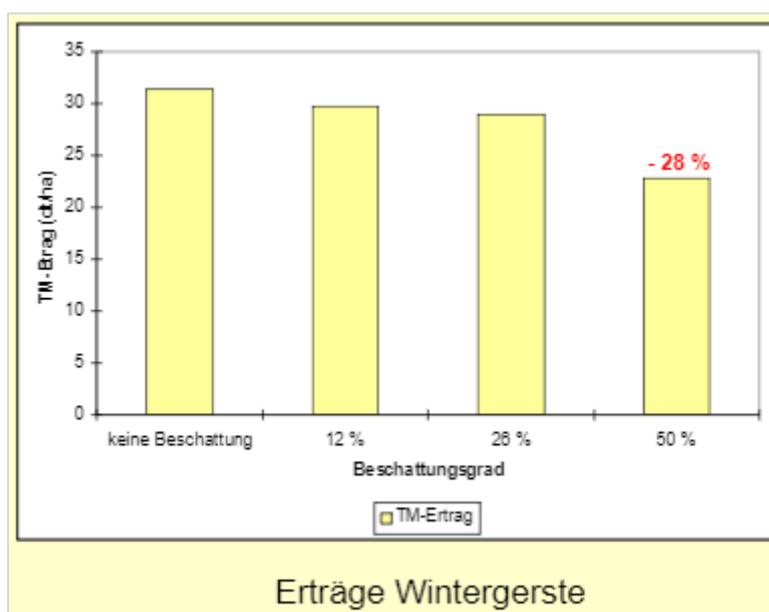


Abbildung 65: Erträge von Wintergerste bei einem Schattierungsversuch des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums Augustenberg (Seidl, 2014).

Empfehlungen: In **Thüringen** werden auf 210.195 Hektar Weizen und auf 110.676 ha Gerste angebaut. Ein Anbau von Gerste unter APV wäre dem Anbau von Weizen unter APV vorzuziehen. Allerdings ist dies einerseits abhängig von der eingesetzten APV-Technik und andererseits auch vom Standort. Zu bewerten sind die positiven Effekte der APV-Anlage unter problematischen Wetterbedingungen, wie oben aufgeführt. In den Bereichen des **Thüringer Beckens**, den Randlagen des Thüringer Beckens, des **Ostthüringer Lössgebiets**, sowie des **Ostthüringer Buntsandsteingebiets** sind APV-Anlagen deshalb als Adaptionenmaßnahme an den Klimawandel auch für Weizen zu empfehlen. Sowohl heiße Tage als auch geringe

Niederschlagsmengen und Spätfröste können die Getreideerträge bis zum Totalausfall beeinflussen, sodass die etwas geringeren Erträge, die durch die Schattierung der APV-Anlage entstehen, im Vergleich über die Jahre wohl wenig zu Buche schlagen würden.

5.5.2 Monokotyle Arten – Futtergras

Forschungsergebnisse: Im Forschungsprojekt **APV-Resola** reagierte Klee gras in beiden Versuchsjahren mit Ertragsdefiziten von 5 % – 8 % durch die schattierende Wirkung der APV-Anlage (Trommsdorff et al., 2020). Schattierungsversuche des **LTZ Augustenberg** zeigen, dass Grünland bei einer **Schattierung von 26 %** beim 1. Schnitt sogar **höhere Erträge** als bei 12 % Schattierung verzeichnete und der Referenzfläche nur minimal nachstand (Seidl, 2014) (Abbildung 66).

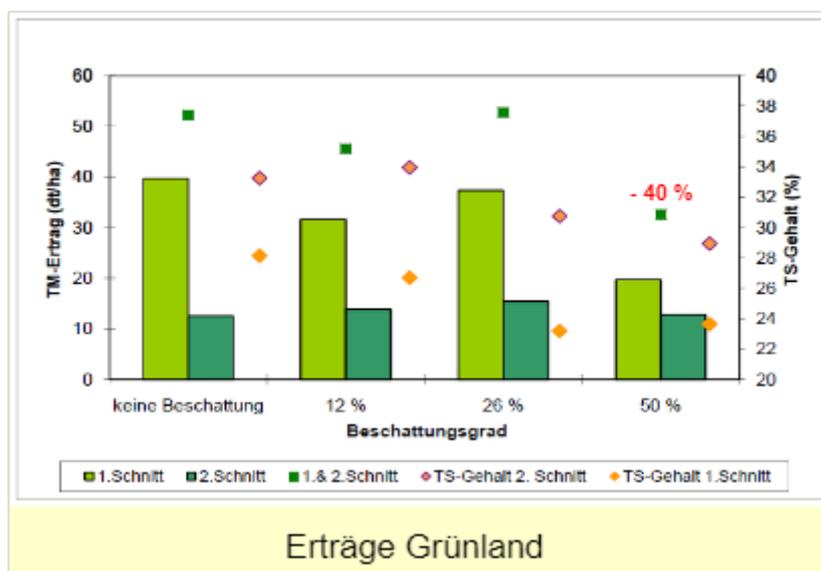


Abbildung 66: Erträge bei Grünland bei unterschiedlichen Schattierungsstufen bei einem Versuch des Landwirtschaftlichen Technologiezentrums Augustenberg (Seidl, 2014).

Bei der Beurteilung der Ergebnisse aus reinen Schattierungsversuchen sollten die stärkeren, positiven Effekte der APV-Anlagen auf Mikroklima und Boden berücksichtigt werden. Die **Firma Next2Sun** berichtet, dass auf einer **Dauergrünlandfläche** von 7 ha in Dirmingen im Jahr 2020 zwischen den vertikalen APV-Modulen **höhere Erträge** erreicht werden konnten, als auf der Referenzfläche ohne APV-Module. Bei einem weiteren Versuch mit Solarmodulen auf Weiden konnte herausgefunden werden, dass sich die **Biomasse** unter den Paneelen in der Spätsaison um **90 %** erhöhte. Auch bei der **Wassereffizienz** schnitten die beschatteten Flächen signifikant besser (**328 % effizienter**) ab als die ungeschatteten Kontrollflächen (Adeh et al. 2018). Die Autor*innen postulieren, dass gerade auf halbtrockenen Weiden mit feuchten Wintern, wie sie beispielsweise auch in Thüringen vorkommen, PV-Anlagen sehr vorteilhafte Effekte für die angebaute Kultur hervorbringen können (Adeh et al., 2018).

Empfehlungen: In **Thüringen** werden auf 11.917 ha **Futtergräser** angebaut, und 168.399 ha

gelten als **Dauergrünland**. Die Installation von vertikalen APV-Anlagen wird empfohlen, aber hoch-aufgeständerte Anlagen sind auch möglich, denn je nach Standortbedingungen und Artenzusammensetzung der Futtergräser können sich, wie oben aufgeführt, zumeist positive Effekte ergeben, aber auch Ertragsreduktionen sind möglich. Bei **Kleegrass** konnte ein leichter Ertragsrückgang bei einer Reduktion der PAR um 30 % festgestellt werden, dem gegenüber sollte die Verbesserung des Mikroklimas durch die Schattierung durch APV gestellt werden, welche die Transpiration von Boden und Pflanze herabsenken und damit Erträge steigern können.

5.5.3 Monokotyle Arten – Mais

Forschungsergebnisse: **Mais** als C4-Pflanze ist an Standorte mit höherer Lichtintensität angepasst. Weiterhin liegt auch der Lichtkompensationspunkt wesentlich höher. In einem Schattierungsversuch in einem **Agroforst-Projekt** reagierte **Mais** stark negativ auf unterschiedliche Schattierungsvarianten (Schulz et al., 2016).

Empfehlungen: **Mais** wird auf einer Fläche von rund **69.000 ha** in **Thüringen** angebaut und zählt damit zu einer der wichtigsten Kulturen. Von einem Anbau *unter* APV-Modulen ist auf Grund der Forschungsergebnisse abzuraten. Der Streifenanbau mit leicht-aufgeständerten Modulreihen mit Trackingfunktion zwischen denen der **Mais** wächst, ist jedoch möglich und wird bereits praktiziert (Scharf et al. 2021). Bei dieser Variante wird die Kulturpflanze nicht schattiert, die Abstände sind frei wählbar, und die Trackingfunktion der Module ermöglicht eine sehr effiziente Ausnutzung der Sonneneinstrahlung ebenso wie die Bearbeitung mit Traktoren und Geräten.

5.5.4 Dikotyle Arten – weitere Futter-, Energie- und Rohstoffpflanzen in Thüringen

Hierzu zählen die **kleinkörnigen Leguminosen** mit einer thüringenweiten Anbaufläche von 19.963 ha und **Hanf** mit 533 ha. Bei den kleinkörnigen Leguminosen zeigte sich zumindest Luzerne als gut für APV geeignet (Dupraz et al., 2011b; Marrou et al., 2013c; Dinesh & Pearce, 2016).

Aus den vorangegangenen Recherchen zur Physiologie von Pflanzen ist zu schließen, dass **Hanf** auch als für APV geeignet einzustufen ist. Auf Grund der großen Blattflächen und der hohen Blattanzahl sollte **Hanf** niedrige Lichtintensitäten gut ausnutzen können. Weiterhin wurde vermehrt festgestellt, dass Pflanzen auf Schattierung mit der Vergrößerung ihrer Blattfläche reagieren. Als dikotyle Art ist auch die Photosyntheserate höher. Die Assimilatespeicherung erfolgt bis zur Ernte in den Blättern, sodass über die gesamte Vegetationsdauer Photosynthese betrieben werden kann und die partielle **Schattierung durch die APV-Anlagen** vor allem in wärmeren, trockeneren Jahren, **positive Effekte** mit sich bringen sollte.

5.5.5 Dikotyle Arten – Hackfrüchte

Forschungsergebnisse: In einem Versuch mit Kartoffeln unter APV konnten niedrigere Temperaturen als auf der Referenzfläche gemessen werden. Die Kartoffelpflanzen und der Boden transpirierten deutlich weniger. Die Blattflächen der Pflanzen vergrößerten sich (Wilockx et al., 2020). Die **Kartoffel** kann von einer **Schattierung profitieren**. Das zeigten auch Trommsdorff et al. (2021) sowie Beck et al. (2012). Im Projekt **APV Resola** gingen bei **Knollensellerie** bei einer um 30 % reduzierten PAR die Erträge 2017 um 19 % zurück und stiegen 2018 um 12 % an. Die oberirdische Biomasse, welche für die Ausbildung der Wurzelbiomasse ein wesentlicher Parameter ist, nahm in beiden Jahren zu. Es kam zu keiner signifikanten Reduktion der Blattmasse (Weselek et al., 2021). Zu **Zuckerrüben** liegen bislang keine Ergebnisse vor.

Empfehlungen: Kartoffeln (Anbaufläche in Thüringen: 1.670 ha), Knollensellerie und Zuckerrübe (Anbaufläche in Thüringen: 11.100) gehören zu den dikotylen Arten, welche hohe Photosyntheseraten aufweisen. **Knollensellerie** und **Zuckerrüben** verfügen über einen hohen Blattflächenindex von 3-4 (Diepenbrock et al., 2016), welcher für **Kartoffeln** auch angenommen werden kann. Zudem reagierten sowohl Kartoffeln (Wilockx et al., 2020), als auch Knollensellerie (Trommsdorff et al., 2021) mit einer Vergrößerung der Blattflächen, wodurch entsprechend viel Assimilate in die Knollen und Wurzel einlagert werden können. Vorteilhaft ist neben der Schattierung die Erhöhung der Bodentemperatur unter den Modulen. Damit könnte die Mindestkeimtemperatur von 5°C bei **Zuckerrüben** (Diepenbrock et al., 2016) schneller und stabiler erreicht werden, sodass ein homogener Feldaufgang gesichert ist. Weiterhin verhindern mildere Temperaturen das Schossen der **Zuckerrüben**, welches nach Spätfrösten auftreten kann und unerwünscht ist. **Kartoffeln** reagieren auf geringe Frosttemperaturen mit Kraut- und/oder Knollensterben (Diepenbrock et al., 2016). Bei **Temperaturen über 32 °C** wird das Knollenwachstum eingestellt, sodass auch hier die **Vorteile durch APV** überwiegen sollten. Auf Grund der dem Knollensellerie sehr ähnlichen Morphologie könnten die Beobachtungen an Sellerie ggf. auch auf Zuckerrüben übertragen werden. Untersuchungen stehen noch aus. Die Installation von **APV über Hackfrüchten ist** angesichts der klimawandelverursachten Veränderungen **zu empfehlen**.

5.5.6 Dikotyle Arten – Hülsenfrüchte

Forschungsergebnisse: Zu **Ackerbohne** und Erbsen liegen noch keine wissenschaftlichen Belege vor, sodass nachfolgend nur Rückschlüsse anhand physiologischer Merkmale getroffen werden können.

Empfehlungen: Hülsenfrüchte werden als Ganzpflanze geerntet und in Tierbetrieben als Futtermittel eingesetzt. **Hülsenfrüchte** verfügen über mittlere Blattflächen und -anzahl, wodurch ihnen mittlere Netto-Photosyntheseraten zugesprochen werden. Als nicht-terminierte Arten verteilen sie die in den Blättern gebildeten Assimilate gleichmäßig in der Pflanze, sodass

alle „sinks“ im Rahmen des Möglichen versorgt werden können. Durch partielle Schattierung könnte das Blattwachstum angeregt werden, was zur Folge hat, dass zur Blütezeit ausreichend Assimilate gebildet und in die Körner eingelagert werden können. Die Schattierung durch **APV** führt auch zu etwas erhöhter Luftfeuchtigkeit. Diese könnte sich **vorteilhaft** auf **Ackerbohnen** (Anbaufläche in Thüringen: 3.535 ha) auswirken, da diese einen **hohen Wasserbedarf** haben. **Erbsen** (Anbaufläche in Thüringen: 8.682 ha) sind sehr anfällig für pilzliche Schaderreger, sodass höhere Luftfeuchten im Bestand, wie sie in APV-Systemen vorzufinden sind, sich problematisch auswirken könnten – dies aber nur bei hohen Luftfeuchtwerten, denn oftmals geben prozentbezogene Werte aus Veröffentlichungen dazu nicht genügend Informationen. Allerdings könnten Erbsen **unter APV bessere Keimungsbedingungen** vorfinden, da sich die Bodenfeuchtigkeit erhöht (Trommsdorff et al., 2021). Ein weiterer zu diskutierender Aspekt ist auch die Druschreife bei beiden Kulturen, welche sich gerade in feuchten Jahren stark nach hinten verlagern könnte.

5.5.7 Dikotyle Arten – Ölfrüchte

Forschungsergebnisse: APV-Anlagen scheinen keinen **negativen Einfluss auf Winterraps** zu haben (Obergefell et al., 2013). Für Sonnenblume konnte in einem Versuch festgestellt werden, dass eine Verringerung der solaren Strahlung um 20 % ab Blühbeginn zu einer reduzierten Kornanzahl führt (Cantagallo et al., 2004). Für Öllein liegen bislang keine Einschätzungen vor.

Empfehlungen: Winterraps, Sonnenblumen und Öllein gehören zu den Körnerfrüchten, unterscheiden sich aber sonst sehr stark in ihren Eigenschaften. Als dikotyle Arten mit mittlerer Blattanzahl und mittleren Blattflächen können **Raps und Sonnenblumen** mittlere Photosyntheseraten zugeschrieben werden. Die Aussaat von **Raps** sollte spätestens am 25. August erfolgen (Graf et al., 2013). Die Kultur bestockt sich also in den Wintermonaten, in denen bereits ohne APV nur wenig Licht zur Verfügung steht. Dies könnte zur Folge haben, dass der **Raps** mit APV im Frühjahr gegenüber einem Rapsschlag ohne APV in der Entwicklung verzögert sein könnte. Gerade in kühleren Jahren ist dies zu erwarten, allerdings wird mit einem Anstieg der wärmeren Jahre gerechnet. In sehr warmen Jahren könnte mit einer vergleichbaren Etablierung des Bestandes gerechnet werden, aber auch mit einer Verschiebung der Druschreife.

Sonnenblumen werden Anfang April bei einer Bodentemperatur von 6°C – 8°C ausgesät (Graf et al., 2006). Da sich die Bodentemperatur unter APV-Anlagen im Vorsommer etwas erhöht, könnte dies zu einem homogenen Aufgang der Saat beitragen. Sonnenblumen haben auf Grund ihrer Morphologie einen hohen Assimilatebedarf, um Stängel und Blätter auszubilden. Durch die partielle Schattierung durch APV ist hier mit einem **verringerten Wachstum** zu rechnen, der sich auch auf die Ausbildung des Kornertrags überträgt (Cantagallo et al., 2004). Vorteilhaft könnte sich die sich verringemde Verdunstungsrate unter APV auswirken.

Nach 150 - 170 Tagen ist die **Sonnenblume** dann erntereif (Graf et al., 2006). Dieses Erntefenster fällt bereits in die Herbstmonate, sodass eine ausreichende Druschreife durch die zusätzlich erhöhte Luftfeuchtigkeit unter APV möglicherweise nicht gewährleistet werden kann. **Öllein** als sehr filigranes Gewächs ist in seiner Photosyntheseleistung als eher gering zu bewerten, insofern ist anzunehmen, dass eine Schattierung durch APV eine nicht zu kompensierende **Ertragsminderung** nach sich zieht.

In der folgenden Tabelle 9 werden die Ergebnisse zur Eignung der landwirtschaftlichen Kulturen in Thüringen mit Fokus auf ihre Schattentoleranz zusammenfassend dargestellt. **Ange-sichts der zunehmenden Stressbedingungen durch Klimawandel und der Erhöhung des Flächenertrages (Landäquivalentverhältnis) ist ein Anbau unter APV für die in Thüringen angebauten Ackerkulturen mit Ausnahme von Mais (Anmerkung s. Kapitel 5.5.3) zu empfehlen.**

Tabelle 9: Eignung landwirtschaftlicher Kulturen für Anbau in APV-Anlagen auf Basis von Literatur und Rückschlüssen aus physiologischen Eigenschaften (eigene Darstellung).

Kultur	Ertrag in Schattierungsversuchen			Ertragszuwachs in APV unter Stress (Trockenheit, Frost, Hitze, Starkregen/Hagel, Sturm etc.)	Eignung im Streifenanbau mit bodennahen ^[a] oder Tracking-Modulen ^[b] oder vertikalen Modulen ^[c]
	Ertragszuwachs	weitestgehend neutral	Ertragsrückgang		
Weizen			x ^[1]	x ^[1]	x ^{[a], [b]}
Gerste			x ^[2]	x	x ^{[a], [b]}
Roggen				x	x ^{[a], [b]}
Triticale				x	x ^{[a], [b]}
Futtergras	x ^[7]	x ^[1]		x	x ^{[a], [b], [c]}
Dauergrünland	x ^{[2], [3], [7]}			x	x ^{[a], [b], [c]}
Mais			x ^[4]		x ^{[a], [b]}
Leguminosen				x	x ^{[a], [b], [c]}
Hanf				x	x ^{[a], [b]}
Kartoffel		x ^[1]		x ^[1]	x ^{[a], [b], [c]}
Knollensellerie		x ^[1]		x ^[1]	x ^{[a], [b], [c]}
Zuckerrübe				x	x ^{[a], [b], [c]}
Ackerbohne				x	x ^{[a], [b], [c]}
Erbse				x	x ^{[a], [b], [c]}
Winterraps		x ^[5]		x	x ^{[a], [b]}
Sonnenblume			x ^[6]	x	x ^{[a], [b]}
Öllein				x	x ^{[a], [b], [c]}

[1] Trommsdorff, et al., 2021, [2] Seidl, 2014, [3] Next2Sun, 2021) [4] Schulz, et al., 2016, [5] Obergfell, et al., 2013, [6] Cantagallo, et al., 2004, [7] Adeg et al., (2018).

[a] bodennahe Module = ähnlich PV-FFA, [b] Tracking-Module = leicht-aufgeständerte Module mit Trackingfunktion; [c] vertikale Module = vertikale aufgeständerte, bifaziale Module. Der Anbau bei [a], [b] und [c] erfolgt hier zwischen den Modulreihen.

5.6 Eignung der gartenbaulichen Kulturen in Thüringen mit Fokus auf ihre Schattentoleranz

5.6.1 Kohlgemüse

Forschungsergebnisse: In einem **Versuch in Davis, Kalifornien** wurden **Grünkohl** und **Brokkoli** auf ihre Eignung unter APV getestet (Hudelson & Lieth, 2021). Brokkoli brauchte mindestens 85 % der PAR, um erntefähige Erträge zu erzielen. **Grünkohl** zeigte **23 % Ertragsverluste** im Vergleich zur vollsonnigen Kontrolle und bildete bei 55 %, 62 % und 85 % der PAR ähnliche Erträge, reagierte damit kaum auf zunehmende Beschattung. Für Grünkohl und Brokkoli konnte in einem Versuch, eine verminderte Blatttemperatur festgestellt werden, was bei hohen Temperaturen einen positiven Einfluss auf die Photosyntheseleistung hat (Oleskewicz, 2020).

Empfehlungen: **Kopfkohl** könnte aufgrund der höheren Blattanzahl und -fläche möglicherweise die Schattierung durch APV in gewissem Maß kompensieren, besonders, wenn zusätzlich Schutz vor weiteren Stressbedingungen notwendig ist. Da die Assimilateverteilung vorwiegend in die Blätter, die auch das Ernteorgan darstellen, erfolgt, kann es zu keiner Konkurrenz zwischen den „Sinks“ unterschiedlicher Organe in den Pflanzen kommen. Aufgrund der positiven Effekte von APV auf das Mikroklima könnte es beim Anbau von **Kopfkohl- und Grünkohl** zu einer besseren Wasser- und Nährstoffversorgung kommen. Da **Grünkohl** erst spät gepflanzt wird, könnte eine APV-Anlage die Jungpflanzen an Tagen mit höherer Sonneneinstrahlung schützen, Ertragsverluste sind aber nach Literaturlage bei verschiedenen Verschattungen beobachtet worden – ausschlaggebend ist der Stressfaktor der jährlichen Wetterbedingungen. Aussagen sind somit schwierig.

Ein weiteres zu betrachtendes **Kohlgemüse** in **Thüringen** ist **Kohlrabi**. Je nach Sorte und Jahreszeit steht er nur 12 bis 20 Wochen auf dem Acker. In dieser Zeit muss er schnellstmöglich Assimilate bilden, die das Blattwachstum und auch das Knollenwachstum voranbringen. Gerade im Frühanbau kann eine zusätzliche Schattierung dieser Kultur zu erheblichen Ertragseinbußen führen. Ab Mai könnten die **positiven Effekte durch APV** überwiegen, zumindest in sehr warmen, trockenen Jahren. Extreme Hitze verhindert das Pflanzenwachstum. Der **Blumenkohlanbau** unter APV ist ebenso differenziert zu betrachten. Im Früh- und Spätanbau könnten auf Grund der geringeren Sonneneinstrahlung Ertragseinbußen zu verzeichnen sein, da die geringe Blattanzahl nicht ausreichend Assimilate für den „sink“ im Blütenstand bilden kann. Dies zeigte auch der **Brokkoli**-Versuch von Hudelson und Lieth (2021). Brokkoli und Blumenkohl sind sich im Habitus sehr ähnlich. Im Sommeranbau könnte sich die Assimilatebildung möglicherweise erhöhen, allerdings muss dies nicht zwangsläufig bedeuten, dass sie für die Verdickung des Blütenstandes ausreichend ist. Bei **Rosenkohl** könnte sich dies noch stärker auswirken. Die Vegetationszeit und damit auch die Möglichkeit, Assimilate einzulagern, ist zwar länger als beim Blumenkohl oder Brokkoli, jedoch erfolgt die Ausbildung des Ernteorgans

erst spät im Oktober. Zu dieser Zeit müssen alle wachstumsfördernden Bedingungen erfüllt sein, was die Sonneneinstrahlung, die bereits ohne APV in den Herbstmonaten geringer ist, inkludiert. Rosenkohl ist möglicherweise die am wenigsten geeignete Kohlart.

5.6.2 Monokotyle Blatt- und Stängelgemüse

Forschungsergebnisse: Für **Porree** liegen bislang noch keine Forschungsergebnisse vor.

Empfehlungen: Als winterannuelle, monokotyle Gemüseart sind niedrige Photosyntheseraten zu erwarten. Weiterhin sind nur etwa 50 % der Porree-Pflanze photosynthetisch aktiv, da der weiße Teil ohne Chlorophyll keine Photosynthese betreiben kann. Vorteilig in Bezug auf die Schattentoleranz könnten sich die sehr breiten, dicken Blätter des Porrees auswirken, bei welchen zumindest im Sommeranbau eine ausreichende Photosyntheseleistung ohne starke Ertragseinbußen zu erwarten ist. Weiterhin **positiv** könnte sich **die transpirationmindernde Wirkung von APV-Anlagen** auf den Porreeanbau auswirken. Für den Frühjahrs- und Herbstanbau mit niedrigen Lichtintensitäten ist Porree unter APV eher weniger zu empfehlen, da die reduzierte Strahlung und die niedrige Photosyntheserate zu Ertragsrückgängen führen könnten.

5.6.3 Dikotyle Blattgemüse

Forschungsergebnisse für Feldsalat, Spinat, Salate, Mangold: Versuche zeigten, dass beispielsweise **Salate** bei nur 70 % Einstrahlung eine verbesserte Strahlungsempfangseffizienz aufwiesen. Dies konnte auf die sich **im Schatten vergrößernden Blattflächen** zurückgeführt werden (Marrou et al., 2013b). Bei Hudelson und Lieth (2021) wurden sowohl **Spinat**, als auch **Mangold** unter APV getestet. Mangold brachte bei nur 85 % der PAR **ähnliche Ertragsmengen** wie die Kontrolle, die vollsonnig stand. Bei 55 % bis 62 % der PAR sanken die Erträge nur minimal. Spinat hingegen reagierte bei allen PAR unter APV mit signifikant geringeren Erträgen im Vergleich zur Kontrolle. Aber es konnte ein linearer, positiver Zusammenhang zwischen ansteigender PAR und Biomasse festgestellt werden (Hudelson & Lieth, 2021). In anderen Versuchen konnte gezeigt werden, dass **Spinat** durchaus von der Schattierung durch **APV profitieren** kann (Touil et al., 2021). In einem Versuch konnten niedrigere Blatttemperaturen bei Mangold unter APV festgestellt werden, was in Hitzeperioden das fortgehend Wachstum begünstigt (Oleskewicz, 2020).

Empfehlungen: Dikotyle winter-/annuelle Blattgemüse weisen höhere Photosyntheseraten auf und reagieren auf Verschattung wie alle anderen Pflanzen auch mit vermehrtem Blattwachstum. Die erhöhte Blattanzahl sorgt für eine erhöhte Fähigkeit zur Photosynthese, trotz der Lichtreduktion durch APV. Die aus der Photosynthese generierten Assimilate werden direkt wieder in die Blätter eingebaut, da diese die einzigen „sinks“ in der Pflanze darstellen. Bei **dikotyten Blattgemüsen unter APV ist somit mit einem Mehrertrag** sowie mit einem reduzierten Wasserbedarf der Kulturen auf Grund der verminderten Transpiration unter den

Modulen zu rechnen. Spinat sollte in dieser Hinsicht weiter untersucht werden, beispielweise mit angepassten Anlagentypen. Gerade der letzte Punkt ist wegweisend, bei einer ressourcenschonenden Zusatzbewässerung im Anbau von flachwurzelnenden Arten.

5.6.4 Perennierende Blatt- und Stängelgemüse

Forschungsergebnisse Spargel, Rhabarber: Bislang liegen keine Versuchsdaten in unseren Breitengraden vor. Ein Versuch zu Spargelanbau unter ‚attraktiven‘ Faltmodulen findet an der Universität Leuven statt (s. Abbildung 28) (Willcockx, 2020).

Empfehlungen: Reziprok zu den annualen Blatt- und Stängelgemüsen ist anzunehmen, dass die reduzierte Sonneneinstrahlung bei **Rhabarber** das Blattwachstum vorantreibt. Dies bedeutet aber auch, dass die produzierten Assimilate erst einmal nicht in die Stängel, das Erntegut, eingelagert werden können. Wichtig für die Ausbildung des Stängels ist auch die Reservestoffeinlagerung aus dem Vorjahr (Konrad & Knapo, 2011). Wenn also nach der Ernte, die spätestens Ende Juni erfolgt, ausreichend Wasser und Nährstoffe zur Verfügung stehen, ist davon auszugehen, dass der **Rhabarber** über das Jahr ausreichend Reservestoffe einlagern kann. Die klimaregulatorische Wirkung von **APV-Anlagen** kann den **Wasserbedarf** und die Gefahr der **Photoinhibition** durch zu starke Sonneneinstrahlung bei Rhabarber vermindern.

Spargel benötigt ein besonderes Mikroklima, welches im Gartenbau durch das Anlegen von Dämmen und das Verkleiden der Dämme mit einer zweifarbigen Folie erreicht wird. Die schwarze Folie hält den Bodenfrost zurück, die weiße Folie sorgt im Sommer für Schattierung der Verminderung der Verdunstung des Bodens. Ein **faltbares APV-System**, welches ab November über die Dämme zu fahren ist und einerseits vor Frost und andererseits vor Verdunstung schützt, hätte **großes Potential** (s. Abbildung 25, Kapitel 3.1.4.2) (Willcockx, 2020). Sobald der Spargel im Sommer austreibt, sollte die APV-Anlage zwischen den Dämmen liegen, sodass sich die Photosyntheserate nicht vermindert wird. **Spargel** hat generell nur eine sehr geringe Photosyntheserate, zudem sind die „Blattflächen“ sehr klein, sodass bei einer Kombination mit **APV über** dem Bestand eher mit einem Ertragsrückgang im Folgejahr zu rechnen ist.

5.6.5 Wurzel- und Knollengemüse

Forschungsergebnisse Speisezwiebeln, Möhren: Versuche unter Solarkollektoren in Wales zeigten, dass das Frischmasse- und Trockenmassegewicht bei Zwiebeln unter den Modulen verglichen mit der ungeschatteten Variante zurück ging (Kadowaki et al., 2012). Für Möhren liegen bislang noch keine Forschungsergebnisse vor.

Empfehlungen: Speisezwiebeln als monokotyle Art mit extrem kleiner Blattfläche erreichen nur geringe Photosyntheseraten, vor allem im Jugendstadium. Es ist anzunehmen, dass dieser schwach ausgebildete Photosyntheseapparat die Bildung von Assimilaten zum Einlagern in die Zwiebel unter reduzierter Strahlung nicht gewährleisten kann. Dementsprechend scheint

es nicht empfehlenswert, Zwiebeln unter APV anzubauen. Bei Möhren ist der Photosyntheseapparat um ein Vielfaches größer. Weiterhin gehören sie zu den dikotylen Arten, welche generell höhere Photosyntheseraten aufweisen. Durch die Schattierung ist zu erwarten, dass auch Karotten mit stärkerem Blattwachstum reagieren. Weiterhin verfügen sie über ein Speicherorgan, in welches nicht für Blätter benötigte Assimilate nahezu von Beginn an eingelagert werden können. Dementsprechend ist vermutlich nur bei sehr frühen Anbausätzen in strahlungsarmen Zeiten mit etwas Ertragsrückgang zu rechnen. In den späteren Anbausätzen sollten die **positiven Effekte durch die APV-Anlage** überwiegen.

5.6.6 Fruchtgemüse

Forschungsergebnisse Gurken, Tomaten, Chili, Jalapenos: Beim Anbau von Gurken unter APV erhöhte sich die Wasserrückhaltefähigkeit des Bodens, was zu einer **Steigerung des Frischmassegewichts** führte (Marrou et al., 2013b). In einem Versuch in USA zeigten Tomaten verbesserte Photosyntheseraten und auch einen verbesserten Transpirationskoeffizienten unter APV, was zu einem **enormen Ertragsanstieg** führte. In demselben Versuch reagierte Chili sogar mit einer **Verdreifachung seiner Produktivität** bei gleichem Wasserbedarf. Nur Jalapenos reduzierten ihr Wachstum unter APV-Modulen (Barron-Gafford et al., 2019). Ein weiterer Versuch mit Tomaten im Freiland zeigte, dass die **Gesamterträge** mit zunehmender Schattierung **sanken**, aber die Wasserproduktivität der Kulturen anstieg (AL-agele et al., 2021). Bei Paprika konnte eine verminderte Blatttemperatur unter einer APV-Anlage festgestellt werden, was positive Auswirkungen auf das Wachstum haben sollte (Oleskewicz, 2020). Ausschlaggebend scheinen die jahresaktuellen Standortbedingungen zu sein.

Empfehlungen: Als dikotylen Gemüse sollte **Kürbis** höhere Photosyntheseraten aufweisen. Die hohe Blattanzahl und -fläche begünstigt dies zusätzlich. Dennoch zählt der Kürbis zu den Starkzehrern, der einen hohen Assimilate-, Nährstoff- und Wasserbedarf vor und nach der Blüte aufweist. Es ist anzunehmen, dass bei einer Schattierung durch APV die gebildeten Assimilate nicht ausreichend sind, um die zum Teil sehr großen Kürbisse zu bilden. Dementsprechend sollten vor einer Kombination von schattierenden APV-Anlagen und dem Anbau von Kürbissen erste wissenschaftliche Versuche durchgeführt werden, um die Ertragsreduzierung beziffern zu können. Bei der Familie der Solanaceae kann der Anbau unter APV durchaus Vorteile mit sich bringen, allerdings sind Tomaten generell schattensensibler als Kartoffeln.

5.6.7 Obstkulturen

APV-Anlagen in Betrieben mit **Obstkulturen** zu **implementieren, scheint vielversprechend**. Die Kultivierung der Kulturen, aber auch die Ernte erfordern kleine Maschinen, was die Spannweite und die damit einhergehenden Material- und Installationskosten senkt (Willockx et al., 2020). Auf Grund der langen Standzeit von 20 Jahren ohne Fruchtfolgen ist die Anlage gut zu planen und zu bewirtschaften. Die regelmäßigen Modulreihen, welche über

der Obstkultur installiert werden, schützen ideal vor Hagel, Regen, Sonnenbrand, Frost und zu starker Sonneneinstrahlung, welche die Verdunstungsrate in die Höhe treibt (Willockx et al., 2020). Weiterhin ersparen sie einerseits die aus Plastik bestehenden, **kurzlebigen Hagel-schutznetze** und ermöglichen im besonderen Maße die Nutzung der gewonnenen **Energie** im Betrieb, da selbige oftmals **Kühlhaus** für die Ernteprodukte betreiben (Willockx et al., 2020). Eine modellhafte, ökonomische Bewertung einer Apfelanlage mit APV in Rheinland-Pfalz ergibt ein profitables System bei EEG-Vergütung des Stroms (Hopf, 2021) (s. Abbildung 75).

Forschungsergebnisse: Im Kernobstanbau mit **Äpfeln** in einer **Forschungsanlage in Südfrankreich** wurde unter partieller Verschattung, der Trockenstress deutlich reduziert und die Temperatur unter den Anlagen um 2°C – 4°C gesenkt (Hörnle et al., 2021). In vergleichbaren Versuchen auf dem **Öko- und Modellversuchsbetrieb** des KOB mit der Apfelsorte Topaz unter dem VÖEN-System wurde durch die Überdachung die photosynthetisch aktive Strahlung um 30 % reduziert, was in dem sechsjährigen Versuch **keinerlei negative Auswirkung** auf die Ertragsquantität oder -qualität hatte. So konnten auch bei der Ausfärbung der **Äpfel** keinerlei Unterschiede festgestellt werden. Sonnenbrandschäden wurden im Jahr 2016 um 11,7 % reduziert (Hörnle et al., 2021).

In einer **Anlage in Rheinland-Pfalz** wurden Lichtverhältnisse **wie** unter Hagelnetzen angenommen und bei 30 % Verschattung im **Birnenbau** ein Massenertragsverlust von etwa **55 %** unter APV **berechnet** (Hörnle et al., 2021). Positive Effekte einer realen APV-Anlage wurden hier nicht berücksichtigt. Die Autor*innen aus Belgien entwickelten ein 3D-Modellierungstool für APV-Anlagen über Obstkulturen. Für **Birnen** kommt es bei der Verwendung von **semi-transparenten Modulen** in einer homogenen Verteilung der Modulreihe parallel zur Baumreihe lediglich zu einer **Reduktion der Früchte um 18 %** und des **Fruchtgewichts um 12 %** (Willockx et al., 2020). Des Weiteren sind die positiven Effekte der Schattierung auf Frucht- und Blatttemperatur sowie Reduktion der UV-Strahlung zu nennen, die den Ertragsverlust durch Sonnenbrand verhindern (Willockx et al., 2020).

In den **Niederlanden** befinden sich bereits einige APV-Anlagen im **Beerenanbau** (Hörnle et al., 2021). Die Wissenschaftler*innen der BayWa r.e. stellten fest, dass sich die chemischen Pflanzenschutzmaßnahmen in den PV-Anlagen verringerten. Ursächlich hierfür halten sie die kürzeren Blattnässephasen, welche den Schweregrad von pilzlichen Erkrankungen eindämmten (Hörnle et al., 2021). Auch Marrou et al. (2013a) beobachteten verringerte Taubildung unter APV. Im Beerenanbau führte eine Reduktion der PAR um 50 % zu einem stark reduzierten Wasserbedarf. Durch die APV-Anlagen **aufgefangenes Regenwasser** kann für die Bewässerung genutzt werden, was in einem geschlossenen System nachhaltig für die Wasser- und Nährstoffnutzung ist (Hörnle et al., 2021). Bei den **Himbeeren** wurde in der Anlage ein **gesteigerter Ertrag** festgestellt, bei der schattierten Variante wurden minimale Mengen von Früchten abgetrieben. Im Pflanzenwachstum und der Blattqualität unterschieden sich die Himbeeren

nicht im Vergleich unter der normalen Folienabdeckung (Agrisolar, 2021). Bei **Walderdbeeren, Brombeeren** und **Himbeeren** wurden **qualitative Veränderungen** in Form einer Erhöhung der antioxidativen Aktivität unter 32 % und 100 % PV-Deckung in Gewächshäusern festgestellt (Blando et al., 2018). Weiterhin verringerte sich der Zuckergehalt bei den Früchten unter der Schattierung. Wolske et al. (2021) fanden bei Himbeeren, Brombeeren und Erdbeeren heraus, dass die Beschattung den Zuckergehalt nicht beeinflusste, die Polyphenole und den Säuregehalt jedoch erhöhte. In einem anderen Versuch mit **Erdbeeren** in einem zu 25,9 % mit PV-bedeckten Gewächshaus konnte gezeigt werden, dass die Erdbeererträge **1,2-mal so hoch** waren, wie in der unschattierten Kontrolle (Tang & Wang, 2020). Wolske et al. (2021) kommen zu dem Schluss, dass sich auch **schwarze Johannisbeeren** unter APV-Anlagen sowie in Agroforst-Systemen eignen. Es konnten **keine konsistenten, negativen Auswirkungen** bei einer Beschattung von 65 % auf saftlösliche Feststoffe, Beerengewicht, Beeren-Trockenmasse und individuellen Anthocyan-Gehalt beobachtet werden. Bei 85 % Schattierung konnte nur in einem der beiden Versuchsjahre eine Verringerung der saftlöslichen Feststoffe festgestellt werden (Wolske et al., 2021). Das durchschnittliche Beeren-Frischgewicht war 2017 um **8 % höher** als in der vollsonnigen Kontrolle, das Trockengewicht der Kontrolle lag jedoch 10 % über dem der schattierten Variante. Im Jahr 2018 hatte die Schattierung keinerlei Einfluss (Wolske et al., 2021). In einem Beerenanbau unter APV in Deutschland, hauptsächlich Heidelbeeren, berichtet Karthaus über 20 % Mehrerträge in Beeren (Solarserver, 2021) (s. Abbildungen 18, 71).

Empfehlungen: Gerade im Obstbau sind die Erträge durch Extremwetter sehr zurückgegangen. Aber auch biotische Faktoren wirken sich ertragslimitierend aus. Beide Aspekte führen schon länger zum Anbau der Obstkulturen unter **Schutzsystemen**. Diesen Systemen fehlt vor allem die Langlebigkeit. So bedarf es in regelmäßigen Abständen eines **Austauschs**, was einerseits Material- und Arbeitskosten verursacht und andererseits große Mengen Abfälle produziert. Demgegenüber schützt eine **langlebige und gewinnerzielende APV-Anlage** die Kulturen vor Hagel, Nässe, Blütenfrost, Hitze, Starkregen und Sonnenbrand. Ergänzend könnten auch Netze zum Fernhalten der Kirschessigfliege installiert werden. Die Veränderung des Mikroklimas könnte einerseits den Blütenfrost reduzieren, andererseits den Wasserbedarf der Kulturen senken und somit das Vertrocknen der Beeren von beispielsweise Holunder oder Himbeere oder Regenschäden an Kirschen verhindern. Bisherige Versuche zeigten, dass Birnen etwas empfindlicher auf die Schattierung reagieren. Eine **Implementierung von APV im Beeren-, Kern- und Steinobst ist zu empfehlen**.

5.6.8 Weitere Sonderkulturen

Forschung Weinbau: Das Klima an den Weinbauhängen in Deutschland entfernt sich zunehmend von den Bedürfnissen der Weintraubensorten (Hörnle et al., 2021). Weintrauben benötigen nur 7 h – 8 h direkte Sonneinstrahlung (Malu et al., 2017). Die Qualität der Weine wird zunehmend durch die **längere Sonnenscheindauer** und die **hohen Temperaturen beeinträchtigt**. Dadurch verändert sich das Zucker-Säure-Verhältnis und der Alkoholgehalt der Trauben nimmt entsprechend zu. Durch die schnellere Reife der Trauben wird die Beerenhaut instabiler und anfälliger gegenüber Phytopathogenen, deren Entwicklung durch die hohen Temperaturen zusätzlich beschleunigt wird (Hörnle et al., 2021). Auch das Befallsverhältnis von Essigsäurebakterien und *Penicillium expansum* kann sich verschieben, was deutliche Weinfehler verursachen kann (Hörnle et al., 2021). Durch die früher einsetzende Vegetationsperiode der Pflanzen wird mehr Aufwuchs gebildet, welcher einen höheren Wasserverbrauch hervorruft. Dadurch kann im Sommer ein **Wasserdefizit** entstehen. Die Blattmasse, aber auch die Blütenknospen sind zudem sehr anfällig für **Frostnächte**. Ein geringer Schaden führt hier zu **Ertragsausfällen in Höhe von 50 % – 70 %**. Durch sehr kühles Wetter können die Blüten verrieseln. Zudem begünstigt es pilzliche Erkrankungen. Knospen der Trauben unter den Solarmodulen öffneten sich im April 1-2 Tage früher als bei der Kontrollvariante, die Färbung und das Wachstum verzögerten sich allerdings im Vergleich zur Kontrolle (Wolske et al., 2021). Dies wird auf die reduzierte Sonneneinstrahlung und die veränderten Temperaturen unter der APV-Anlage zurückgeführt. Gewicht und Zuckergehalt passen sich bei der 2. Ernte an. Es wird empfohlen, die Weintrauben unter APV-Modulen später zu ernten. Die unterschiedlichen Modularten (normal, bifacial, transparent) zeigten keinen signifikanten Einfluss auf das Traubenwachstum (Wolske et al., 2021). **PV-Module könnten auch im Weinbau Spätfröste abmildern, Hagelschutz bieten, den Bestand trockener halten** (weniger Tau, weniger Pilzbefall), vor Sonnenbrand schützen und die Schwankungen im Klima abfedern. In Thüringen erlitt der Weinanbau im Jahr 2021 42 % Verluste (s. Tabelle 5).

Empfehlungen: Die einzige Herausforderung beim Implementieren einer APV-Anlage im Weinbau scheint die Konstruktion derselben zu sein. Die Bebauung an der Hanglage ist durch entsprechende Aufständigung möglich (s. Kapitel 3.1.3). Nur die Flächen, die weniger als 30 % Steigung aufweisen, scheinen nach dem aktuellen Stand wirtschaftlich (Hörnle et al., 2021).

Heilkräuter, Duft- und Gewürzpflanzen: In **Thüringen** werden ca. 20 Kulturen aus dem Spektrum der Heil-, Duft- und Gewürzpflanzen (HDG) angebaut. In den letzten Jahren wurden auf 970 ha – 1030 ha Kamille, auf 180 ha – 250 ha Pfefferminze und auf 50 ha – 75 ha Johanniskraut und auf 20 ha – 50 ha Schafgarbe, Zitronenmelisse, Baldrian und Spitzwegerich kultiviert. Lein und Körnersenf liegen bei einer Anbaufläche von über 1000 ha im Jahr. Ebenso

sind Kümmel, Thymian, Dill, Rosenwurz, Pharmaweide, Tollkirsche und Echter Steinklee in Thüringen angebaute Kulturen.

Empfehlung: Da **Kamille** ein Lichtkeimer ist (Biertümpfel, 2021), könnte es unter einer APV-Anlage zu einem sehr lückigen Aufgang und damit einhergehendem Ertragsausfall kommen. **Pfefferminze** verträgt laut TLLLR keine Hitze und benötigt windgeschützte Lagen. Sie verträgt weder trockene noch vernässte Böden. Hier könnte eine **APV-Anlage interessant** sein. Sie schützt die **Pfefferminze** vor **extremer Hitze und verringert die Transpirationsrate**. Die **beregnungswürdige** Kultur sollte eher positiv auf die Schattierung reagieren und mehr Blattmasse produzieren. Selbiges sollte auch auf **Melisse** zutreffen. **Johanniskraut** bevorzugt nach TLLLR sonnige Lagen, sodass das Kraut eher ungeeignet erscheint. **Schattenverträgliche** HDG sind unter anderem **Bärlauch** oder auch **Waldmeister** (Käferle, 2021). Auch **Schnittlauch** zählt zu selbigen. Eine **erste APV-Anlage mit Schnittlauch** ist durch die Firma Agrosolar Europe in Lüchow installiert worden (NDR, 2021). Eine weitere, noch sehr selten in Deutschland angebaute Kultur ist **Ginseng**. In Japan stehen bereits APV-Anlagen in Kombination mit **Ginseng** oder **Ingwer** (Badelt et al., 2020). Zum Anbau ist dringend eine **Beschattung** notwendig, welche durch **APV-Anlagen** gewährleistet werden kann. Besonders zu beachten sind der hohe Nährstoffbedarf und die Fruchtfolge. Nach 4 bis 6 Jahren sollte der Boden durch Klee gras-Gemische wieder aufgebaut werden. Selbige erzeugen etwas geringere Erträge unter APV (Trommsdorff et al., 2021), was aber zu vernachlässigen ist, da das Klee grasgemisch in seiner Hauptaufgabe, den Boden verbessern soll.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse zur Eignung der gartenbaulichen Kulturen in Thüringen mit Fokus auf ihre Schattentoleranz zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 10: Eignung gartenbaulicher Kulturen für Anbau in APV-Anlagen auf Basis von Literatur und Rückschlüssen aus physiologischen Eigenschaften (eigene Darstellung).

Kultur	Ertrag in Schattierungsversuchen			Ertragszuwachs in APV unter Stress (Trockenheit, Frost, Starkregen etc.)	Eignung im Streifenanbau mit bodennahen ^[a] oder Tracking-Modulen ^[b] oder vertikalen Modulen ^[c]
	Ertragszuwachs	weitestgehend neutral	Ertragsrückgang		
Kopfkohl				X	X ^{[a], [b], [c]}
Grünkohl			X ^[1]	X	X ^{[a], [b]}
Kohlrabi				X	X ^{[a], [b], [c]}
Blumenkohl				X	X ^{[a], [b], [c]}
Brokkoli			X ^[1]	X	X ^{[a], [b], [c]}
Rosenkohl				X	X ^{[a], [b]}
Porree				X	X ^{[a], [b], [c]}
Feldsalat				X	X ^{[a], [b], [c]}
Spinat			X ^[2]	X	X ^{[a], [b], [c]}
Mangold	X ^[1]			X	X ^{[a], [b], [c]}
Salat	X ^[3]			X	X ^{[a], [b], [c]}
Rhabarber				X	X ^{[a], [b], [c]}
Spargel				X ^[4]	X ^{[a], [b], [c]}
Möhre				X	X ^{[a], [b], [c]}
Zwiebel				X	X ^{[a], [b], [c]}
Kürbis				X	X ^{[a], [b], [c]}
Tomate	X ¹⁰			X	
Chili	X ¹⁰			X	
Jalapenos			X ¹⁰	X	
Äpfel	X ⁵		X ⁵	X	X ^[b]
Birne		X ⁶	X ⁶	X	X ^[b]
Süß- / Sauerkirschen				X	X ^[b]
Pflaumen und Zwetschgen				X	X ^[b]
Beeren (Himbeeren, Brombeeren, Erdbeeren, Heidelbeeren)	X ^{5, 7, 8}			X	X ^{[a], [b]}
Wein	X ⁵	X ⁵		X	X ^[b]
Kamille					X ^{[a], [b], [c]}
Pfefferminze				X	X ^{[a], [b], [c]}
Melisse				X	X ^{[a], [b], [c]}

Kultur	Ertrag in Schattierungsversuchen			Ertragszuwachs in APV unter Stress (Trockenheit, Frost, Starkregen etc.)	Eignung im Streifenanbau mit bodennahe ^[a] oder Tracking-Modulen ^[b] oder vertikalen Modulen ^[c]
	Ertragszuwachs	weitestgehend neutral	Ertragsrückgang		
Johanniskraut					x ^{[a], [b]}
Bärlauch	x			x	x ^{[a], [b], [c]}
Waldmeister				x	x ^{[a], [b], [c]}
Schnittlauch	x ⁹			x	x ^{[a], [b], [c]}
Ginseng	x ¹¹			x	x ^{[a], [b], [c]}
Ingwer	x			x	x ^{[a], [b], [c]}

[1] Hudelson & Lieth, 2021, [2] Touil et al., 2021, [3] Marrou et al., 2013c, [4] Willockx et al., 2021, [5] Hörnle et al., 2021, [6] Willockx et al., 2020, geringer Einfluss bei semi-transparenten Modulen, [7] Firma BayWa r.e., [8] Blando et al., 2018, [9] Firma Agrosolar Lüchow, Zuwachs wird erwartet, [10] Barron-Gafford et al., 2019 – unter Hitzebedingungen in USA, [11] Badelt et al., 2020

[a] bodennahe Module = ähnlich PV-FFA, [b] Tracking-Module = leicht-aufgeständerte Module mit Trackingfunktion; [c] vertikale Module = vertikale aufgeständerte, bifaziale Module. Der Anbau bei [a], [b] und [c] erfolgt zwischen den Modulreihen.

5.7 Fazit

In diesem Kapitel wurden Potentiale für APV-Anlagen in Kombination mit in Thüringen angebauten Kulturpflanzen aufgezeigt. Zur Relevanz der Kulturen im Folgenden die Flächenverteilung nach landwirtschaftlichen Kulturen (a) und Sonderkulturen (b), in absteigender Reihenfolge: **(a)** Winterweizen (einschl. Dinkel, Einkorn) 199.656 ha, Winterraps 98.620 ha, Wintergerste 77.491 ha, Silomais/Grünmais 63.133 ha, Sommergerste 33.186 ha, Leguminosen (Grünpflanzenernte) 19.963 ha, Triticale 12.841 ha, Feldgras/Grasanbau 11.917 ha, Zuckerrüben 11.100 ha, Roggen und Wintermenggetreide 10.484 ha (TLS, 2021), **gesamt 538.391 ha**, davon 110.000 ha für Energieerzeugung; **(b)** Äpfel 1.024 ha, Hanf 533 ha, Hopfen 400 ha, Spargel 329 ha, Süßkirschen 274 ha, Sauerkirschen 187 ha, Erdbeeren 177 ha, Pflaumen und Zwetschgen 156 ha, Speisezwiebeln 122 ha, Weihnachtsbaumkulturen 109 ha, Weißkohl 109 ha, Reben 78 ha und schwarzer Holunder 75 ha, **gesamt 3.571 ha**.

Bei der Beurteilung der Eignung der Kulturpflanzen für den Anbau unter APV muss zwischen zu erwartenden Ertragsverlusten durch Trockenheit und Extremereignisse wie Starkregen, Sturm, Hagel oder Hitze und einem möglichen Ertragsverlust durch Beschattung, aber einem Benefit durch die schützende Wirkung der Schattierung, abgewogen werden. Mit den **leicht- und hoch-aufgeständerten Varianten der APV-Anlagen** ist ein gewisser Schutz aller in Thüringen bislang angebauten Kulturen vor den bereits bestehenden und den zukünftigen Ertragsverlusten durch Klimaerhitzung und Extremwetterereignissen möglich. Besonders sind Kulturen zu priorisieren, die in bisherigen wissenschaftlichen Versuchen positiv oder relativ neutral

auf die Schattierung reagierten oder als schattentolerant bekannt sind oder eingeschätzt werden (Abbildung 67). Hierzu zählen landwirtschaftliche Kulturen wie **Kartoffeln und Knollensellerie**, und auch das Dauergrünland. Weiterhin sind Sonderkulturen wie Blattgemüse, **Gurken**, Himbeeren, Johannisbeeren, Heidelbeeren, sowie **Bärlauch, Pilze und Ginseng** zu nennen, die als am geeignetsten für den Anbau unter APV-Anlagen erscheinen, und bedingt Äpfel, Birnen, Holunder, Erdbeeren und Wein. Werden allerdings, wie oben ausgeführt, die in den letzten Jahren in Thüringen beobachteten **wetterbedingten Ertragsverluste** einbezogen, so ist ein **Ertragsgewinn** gegenüber Referenzfeldern ohne APV auch zu erwarten bei: **Getreide (Gersten, Weizen, Roggen, Triticale), kleinkörnigen Leguminosen, Hanf, Zuckerrüben, Kohl (wenige Kohllarten), Äpfel, Birne, Holunder, Süß-/Sauerkirsche, Pflaume, Zwetschge, Wein Hopfen, Melisse, Pfefferminze**. Hier ist in trockenen Jahren eine **Steigerung der Gesamtproduktivität** von APV-Systemen, also Energieproduktion einbezogen, von bis zu 90 % zu erwarten. Mögliche Verluste durch Verschattung bei weniger schattenverträglichen Kulturpflanzen können durch positive Effekte der Modulabdeckung auf die Pflanzen und das Mikroklima insbesondere unter Stressbedingungen ausgeglichen werden. **Verbesserungen** sind für den **Bodenzustand**, das **Wassermanagement** und die **Biodiversität** zu erwarten. Dies gilt insbesondere für die klimatischen Hotspots Thüringer Becken, die Randlagen des Thüringer Beckens, das Ostthüringer Lössgebiet, sowie das Ostthüringer Buntsandsteingebiet, die auch die Gebiete mit den fruchtbarsten Böden sind, auf denen sowohl landwirtschaftliche als auch **gartenbauliche** Erzeugnisse produziert werden. Letztere benötigen zu meist hohe Mengen an **Zusatzbewässerung**, die durch das Auffangen von Regenwasser durch APV-Anlagen gewährleistet werden könnten. Die gartenbaulichen Erzeugnisse sind zudem hoch druckanfällig und müssen schon jetzt vor Regen- und Hagelschäden geschützt werden. Hier könnten die nur kurzfristig nutzbaren Hagelschutznetze ressourcenschonend ausgetauscht werden. Ein weiteres, vermehrt auftretendes Problem, ist der Sonnenbrand durch die zunehmende Sonneneinstrahlung. Dieser zerstört einerseits photosynthetisch aktive Blattfläche und andererseits das Erntegut, zusätzlich zu Schäden durch Trockenheit und Hitze. Letztere kann auch Schäden in der Pollenbildung hervorrufen, welche bei allen Kulturen, deren Früchte/Samen geerntet werden, bis zum Totalausfall führen kann. Hier kann der Anbau unter schattierenden Modulen den Ertrag sichern.

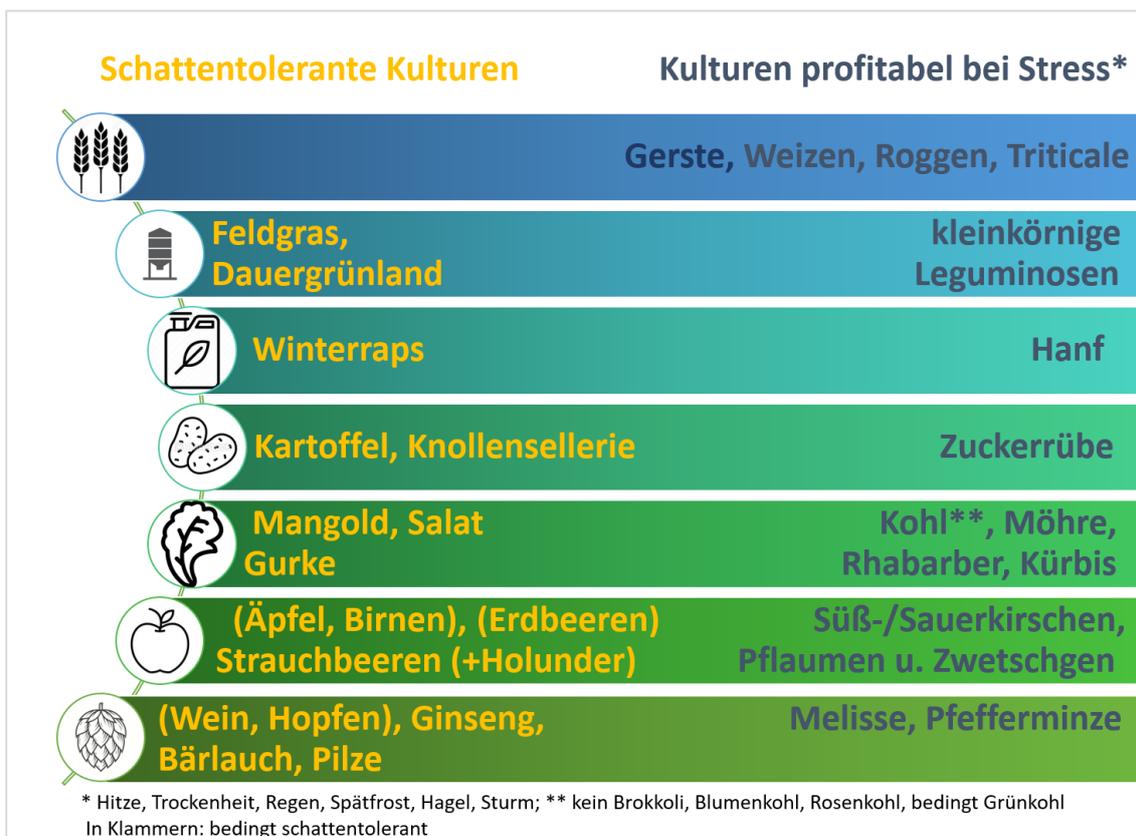


Abbildung 67: Einteilung der in Thüringen angebauten oder für Anbau empfohlenen Kulturen in schattentolerante Pflanzen und Arten, die unter Stressbedingungen im Schutz von APV-Anlagen gute Erträge bringen (eigene Darstellung).

Für den Anbau **zwischen bodennah und/oder vertikal aufgestellten Modulen** sollten generell fast alle Kulturen geeignet sein. Bei geeigneten, bodennah aufgestellten Modulen ist **unter den Modulen** entweder ein Flächenverlust einzukalkulieren (Ersatz durch Blühstreifen), oder es sind an dieser Stelle schattentolerante Kulturen anzubauen.

In den Planungen sollten bereits jetzt absehbare, zukünftige Entwicklungen in der APV-Technologie berücksichtigt werden, damit die Betriebe die für sie passende Kombination aus verschiedenen technischen Variationen der APV-Anlagen und Kulturpflanzen wählen können. Mit Blick auf die landwirtschaftlich genutzten Flächen im Süd-Westen von Thüringen könnten die vertikalen APV-Anlagen in Kombination mit Dauergrünland eine sinnvolle Ergänzung im Betrieb sein. Auch flexible, also **nicht ortsgebundene Anlagen**, beispielsweise bodennahe Falanlagen oder Anlagen auf Rollen sind möglich und erhöhen die Kombinationsmöglichkeiten mit diversen Kulturpflanzen, Anbausystemen, Fruchtfolgen und den dafür notwendigen Arbeitsgeräten. Eine Kostenreduzierung ist mit der Kommerzialisierung der Varianten zu erwarten.

Auf Basis der in diesem Kapitel gemachten Ausführungen (Tabellen 9, 10; Abbildung 63) sind die in Thüringen angebauten Kulturpflanzen generell geeignet für einen Anbau unter APV-Anlagen (Ausnahme Mais, hier Anbau zwischen bodennahen Anlagen mit ‚Tracking-Funktion‘

empfohlen), insbesondere in Anbetracht der zu erwartenden, klimabedingten Ertragsverluste. Daraus ergibt sich: Die Fläche des **Ackerlandes und der Dauerkulturen** (Landwirtschaftsfläche: 774.830 ha; Ackerfläche: **604.086**; **Dauerkulturen 2.280 ha, davon Obstkulturen 1.955 ha; gesamt 606.366 ha**) (TLS 2021) abzüglich der Flächen in Naturschutzgebieten (0,2 %) beträgt **605.153 ha**; berechnet mit einer Produktion von 700 kWp/ha ergäbe dies ein **technisches Potential** von **424 GWp**. Ein weiteres Potential böte das **Grünland von 168.399 ha** (hier müssten in weiteren Untersuchungen noch Einschränkungen kalkuliert werden, wie *extreme* Hanglagen und Ausrichtung, kleine Flächen mit Beschattung durch Wald, etc.) bspw. mit vertikalen Modulen und einer Produktion von 395 kWp/ha, auf dem **66,5 GWp** Strom erzeugt werden könnten. Als Übersicht:

- **Ackerland + Dauerkulturen**
abz. Naturschutzgebiete: **605.153 ha mit 424 GWp** (mit 700 kWp/ha*)
- **Grünland:** **168.399 ha mit 67 GWp** (mit 395 kWp/ha**)
- **Summe**
- **Ackerland + Dauerkulturen und Grünland:** **773.552 ha mit 491 GWp**

* 500 bis 800 kWp/ha (Trommsdorff et al. 2022), bei ‚Tracking‘ Anlagen höher; ** Next2Sun GmbH, 2021.

Damit ergibt sich in Thüringen für Ackerflächen und Dauerkulturen abzüglich der 0,2 % dieser Flächen in Naturschutzgebieten, insgesamt 605.153 ha, ein Potential von 424 GWp (mit 700 kWp/ha). Große Einschränkungen in der Nutzung dieses Potentials bestehen in fehlenden Netzeinspeisepunkten. Hier müssen Lösungen erarbeitet werden.

Auch allein auf der derzeitigen Fläche der **Energiepflanzen** von **110.000 ha** in Thüringen könnten bei einer Stromproduktion von 700 kWp/ha ca. **77 GWp** Strom erzeugt werden. Dem steht ein **Bedarf von 5 GW bis 2030 und 14 GW bis 2040** in Thüringen gegenüber.

APV-Anlagen könnten dazu beitragen, diese Fläche der Nahrungsmittelproduktion zuzuführen, in der üblichen Fruchtfolge im Ackerbau, aber insbesondere auch für die Kulturen und Produkte, in denen eine hohe Unterversorgung in Thüringen besteht (Eigenproduktion in Deutschland: 37 % bei Gemüse, 19 % bei Obst – ohne Zitrus).

Der gewonnene Strom aus APV-Anlagen bietet einerseits eine Einkommensdiversifizierung, unterstützt zusätzlich aber auch die Autarkie und Resilienz der Betriebe in Thüringen. Vor allem Betriebe, die zusätzlich belichten, Kühlzellen, Trocknungsanlagen oder Wasch- und Verpackungsstraßen betreiben, wären so unabhängig vom öffentlichen Stromnetz und den damit verbundenen hohen Strompreisen. Einschränkungen bestehen insbesondere hinsichtlich der Netzanbindung. Ein attraktives Beteiligungsmodell zur Partizipation von Landwirt*innen, Bürger*innen und Kommunen ist bereits von der EU vorgeschlagen und muss in den Ländern

implementiert werden. Auch würde die Stromproduktion durch APV-Anlagen zur **Energieautarkie Thüringens und Deutschlands** beitragen.

6 Rechtliche Rahmenbedingungen

Für ein konfliktarmes Zusammenspiel aus Energiewirtschaft, Umwelt und Bevölkerung sind für den Aufbau Erneuerbarer Energieanlagen bisher Genehmigungsverfahren, wie eine Bauleitplanung oder die Anpassung von bestehenden Flächennutzungs- und/oder Bebauungsplänen notwendig. Jedes Bundesland hat eigene Verfahren zur Realisierung von PV-Anlagen.

Gemeinden sind derzeit noch an §9 BauGB und die Baunutzungsverordnung gebunden, womit der Typenzwang zum Hemmnis wird, da eine Eingliederung schwer bis kaum möglich ist. PV-Anlagen gelten aktuell nach DIN VDE 0100-712 als elektrische Betriebsstätte und damit nicht mehr als landwirtschaftliche Fläche. Eine Anerkennung als landwirtschaftliche Fläche ist ab 01.01.2023 vorgesehen. Da es sich bei APV-Anlagen derzeit nicht um privilegierte Vorhaben nach §35 BauGB handelt und noch nachgewiesen werden muss, dass sie öffentlich-rechtlichen Belangen nicht entgegenstehen, wird die Genehmigung als PV-FFA im Raumordnungsplan [Thüringen: Landesentwicklungsplan (LEP)] bzw. im Flächennutzungsplan (FNP) geregelt. Da im LEP bisher keine Flächen für APV festgeschrieben sind, hätte ein langwieriges Zielabweichungsverfahren zu erfolgen. Auch der FNP müsste entsprechend geändert werden. Es wird ein Bebauungsplan benötigt, der wiederum weitere, kostenaufwändige Gutachten notwendig macht. Die Erstellung des Bebauungsplans findet unter Beteiligung der Öffentlichkeit statt und beansprucht daher einen hohen Zeitaufwand. Für eine Änderung des FNP, sowie die Erstellung eines (vorhabenbezogenen) Bebauungsplans ist mit einem Zeithorizont von zwei bis fünf Jahren zu rechnen (Hörnle, et al., 2021; Rösrath, o.J.). Ein beispielhafter Ablauf eines Bebauungsplanverfahrens ist in Abbildung 68 ersichtlich. Da bisher auch keine „Sondergebiete APV“ nach §11 BauNVO bestehen, ist auch hier eine Vereinfachung der Genehmigung nicht möglich. Auch die Direktzahlungen-Durchführungsverordnung untersagt bisher noch Subventionen für Landwirtschaftsflächen, auf denen Strom mit solarer Strahlungsenergie gewonnen wird. Eine Änderung wird für den 01.01.2023 erwartet.

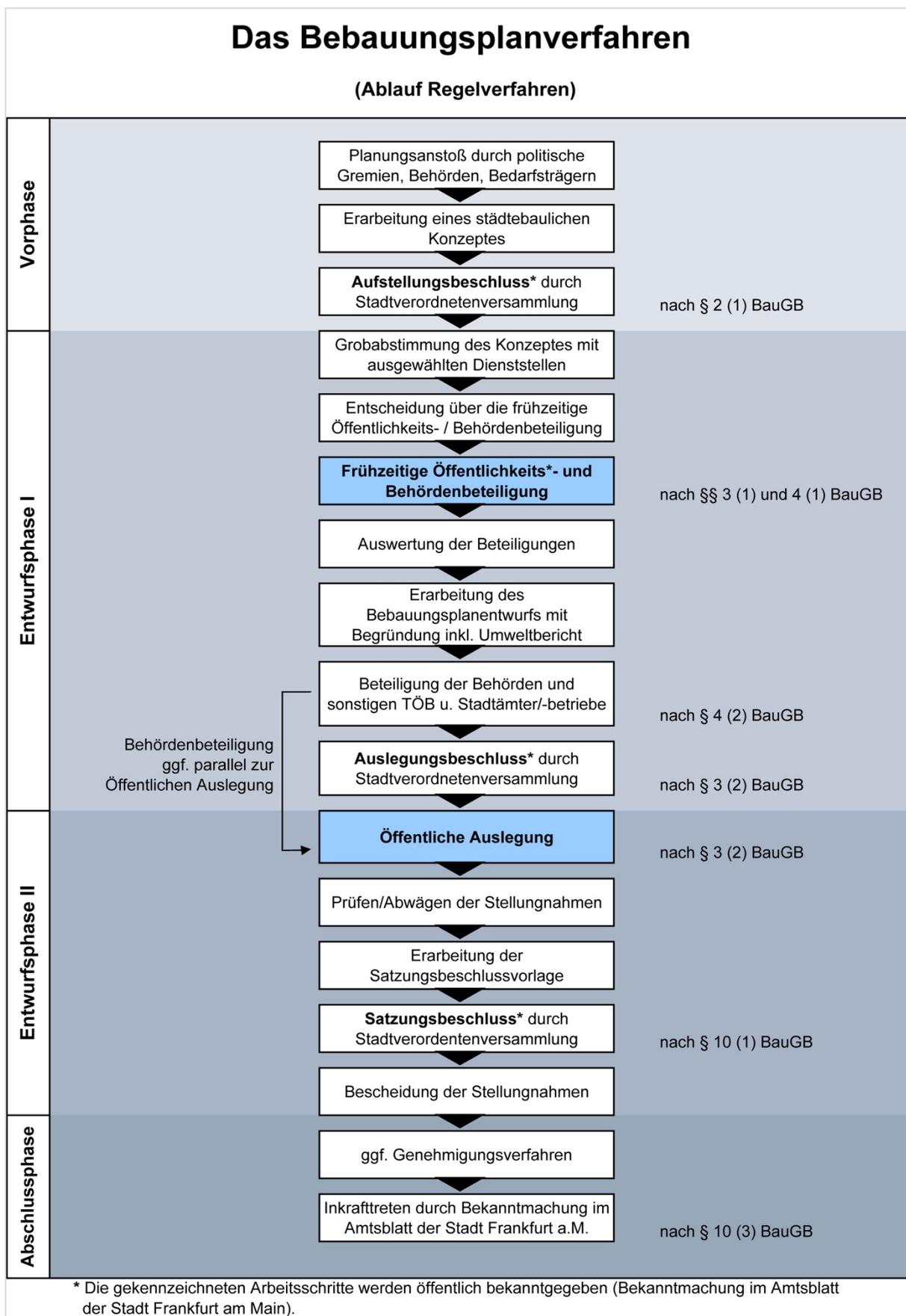


Abbildung 68: Beispielhafter Ablauf eines Bebauungsplanverfahrens (Stadtplanungsamt Frankfurt am Main, o.J.).

Aktuelle Gesetzestexte erschweren den Bau von APV-Anlagen erheblich und diese Verfahren zur Genehmigung sind von zu langer zeitlicher Dauer. In dieser Zeit können sich die angenommenen Vergütungssätze bereits verändert und damit direkt Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit haben. Hinzu kommt der finanzielle Aufwand für eventuelle Gutachten.

So wird gegenwärtig die rasche Umsetzung einer APV nicht erreicht. Es gibt derzeit bundesweit keine rechtlichen Rahmenbedingungen, an denen sich die APV-Projektierer orientieren können. Der aktuelle Stand der Regelungen ist für die Umsetzung der APV nicht geeignet. Wie in Kapitel 4.4 begründet, sollte kein Baugenehmigungsverfahren für diese ‚der Landwirtschaft dienende Maßnahme‘ [eine Hilfs- und Schutzkonstruktion, die sich potentiell mindernd auf bestehende Umweltdefizite (inkl. Klimaveränderungen) auswirkt] notwendig sein.

Im Laufe der Studie wurde deutlich, dass eine Bewertung des Flächenpotentials der APV auf Grundlage möglicher, von den Anlagen ausgehender Wirkfaktoren im Rahmen einer Raumwiderstandsanalyse den Bedingungen der APV auf einer Ackerfläche nicht gerecht wird.

Die Bewertung von Kultur- und Anbaumaßnahmen auf Ackerflächen unterliegt aufgrund der **Privilegierung der Landwirtschaft** speziellen Kriterien. Dazu gehört, dass die Maßnahme eine dienende Funktion für die Landwirtschaft ausüben muss. Nach unseren Erkenntnissen werden diese Maßnahmen von der APV erfüllt. Unter Berücksichtigung der neuesten, wissenschaftlichen Ergebnisse bei der APV und der aktuellen politischen Diskussion zur Flächennutzung der Photovoltaik ist daher zu erwarten, dass durch grundlegende Verbesserungen der rechtlichen Rahmenbedingungen zur dualen Nutzung der Ackerflächen der positive Beitrag der APV zur Stromerzeugung entscheidend gesteigert werden kann.

Unsere Untersuchungen zeigen weiterhin, dass die derzeit hemmenden Wirk- und Restriktionsfaktoren für die APV nicht mehr gelten, weil sie nach den neuesten wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht mehr wirksam sind. Wir haben deshalb Ergebnisse aus Arbeiten zu Wirkfaktoren und Raumwiderstandsanalyse nicht genutzt. Wir haben anstelle der Wirkfaktoren folgenden Ansatz gewählt: Die in Thüringen derzeit genutzte Ackerfläche und Sonderkulturfläche, reduziert um Flächen, die sich in Naturschutzgebieten befinden, diese Fläche ist vollständig nutzbar für die APV-Anlagen. Damit ist Ausgangspunkt dieser Studie: **alle Ackerflächen und Sonderkulturflächen werden grundsätzlich als geeignet** betrachtet und der Bau von APV-Anlagen wird auf diesen Flächen als zulässig eingestuft. Mit diesem Ansatz und der Bewertung der APV auf das Pflanzenwachstum und den Ackerboden in Kapitel 4 und Kapitel 5, lässt sich eine erste Bewertung zum Flächenpotential in Thüringen durchführen (s. Kapitel 5.7).

Inwieweit diese Ackerflächen von den Landwirt*innen mit der APV genutzt werden, wird sicher von den rechtlichen Rahmenbedingungen und der Vergütung für den Ernteertrag bei den Nahrungsmitteln und für den erzeugten Solarstrom abhängen. Auch die Beteiligung der

Kommunen am Stromertrag der Äcker sowie der Bürger*innen kann einen hohen Beitrag zur gesellschaftlichen Akzeptanz dieser Technologie leisten.

Diesen Weg wählt auch das Eckpunktepapier **des BMWK, BMUV und BMEL** (veröffentlicht: 10.02.2022), in dem ein deutlicher Ausbau der PV auch auf landwirtschaftlichen Flächen vorangetrieben werden soll. Darin heißt es: „**Agri-PV-Anlagen sollen auf allen Ackerflächen grundsätzlich zulässig sein.**“ (...) Die Förderung mit GAP-Mitteln ist weiterhin möglich, sofern die landwirtschaftliche Nutzung nur bis zu 15 % durch die Stromerzeugung beeinträchtigt ist. Schutzgebiete, Grünland, naturschutzrelevante Ackerflächen und Moorböden werden aus Gründen des Naturschutzes und des Klimaschutzes ausgeschlossen.“ (BMWK, et al., 2022). Es ist mit hoher Wahrscheinlichkeit davon auszugehen, dass es zukünftig rechtliche Anpassungen dazu geben wird und muss. Insbesondere auch, da das Abwägungsgewicht für Erneuerbare-Energie-Anlagen aufgrund des Klimawandels zunehmen wird. So steht bspw. in §2 Abs. 6 Nr. 2 ROG: „*Den räumlichen Erfordernissen des Klimaschutzes ist Rechnung zu tragen, sowohl durch Maßnahmen, die dem Klimawandel entgegenwirken, als auch durch solche, die der Anpassung an den Klimawandel dienen.*“ (Maslaton, et al., 2021).

Weiterhin steht im Eckpunktepapier geschrieben: „**Beschleunigung von Planung:** *Die Kommunen werden wir durch die Förderung einer Angebotsplanung dabei unterstützen, eine zügige Abwägung öffentlicher Belange und eine sinnvolle, mit dem Netzausbau abgestimmte Verteilung und Konzentration von Anlagen auf der regionalen Ebene voranzubringen und diese mit den erforderlichen gemeindlichen Planungsschritten abzustimmen.*“ Dies bestätigt auch unsere Handlungsempfehlung, dass der Genehmigungsprozess für die Umsetzung von APV-Anlagen deutlich zu vereinfachen ist, um so den Ausbau voran zu treiben. Es wird gefordert, APV-Anlagen in die Liste der privilegierten Vorhaben nach §35 BauGB aufzunehmen (Weisskopf, 2022), oder die Anlagen, wie andere, übliche Kulturschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft zu behandeln.

7 Bestehende Projekte

Der Klimawandel stellt die Landwirtschaft weltweit vor große Probleme. In einigen semi-ariden Regionen der Welt wurden daher bereits schon vor einigen Jahren APV-Anlagen installiert. Von der derzeit **weltweit installierten Agri-PV-Kapazität von über 14 GW** hält China mit ca. 12 GW den weitaus größten Anteil (Wirth, 2022). Andere asiatische Länder wie Japan und Südkorea haben Förderprogramme installiert (Abbildung 69). So plant die südkoreanische Regierung den Bau von 100.000 APV-Anlagen in landwirtschaftlichen Betrieben, um den Landwirt*innen eine Altersvorsorge zu ermöglichen und das Hofsterben einzudämmen. „*Das bisher größte Agri-PV-Projekt, in dem Goji Beeren angebaut werden, wurde in China am Rand der Wüste Gobi realisiert und wird momentan auf eine Leistung von 1 GWp ausgebaut.*“ (Fraunhofer ISE, o.J.). In Europa hat Frankreich frühzeitig (seit 2011) APV-Systeme etabliert,

seit 2017 gibt es dort spezifische Ausschreibungen für APV-Anlagen mit einer installierten Leistung von 15 MW pro Jahr.

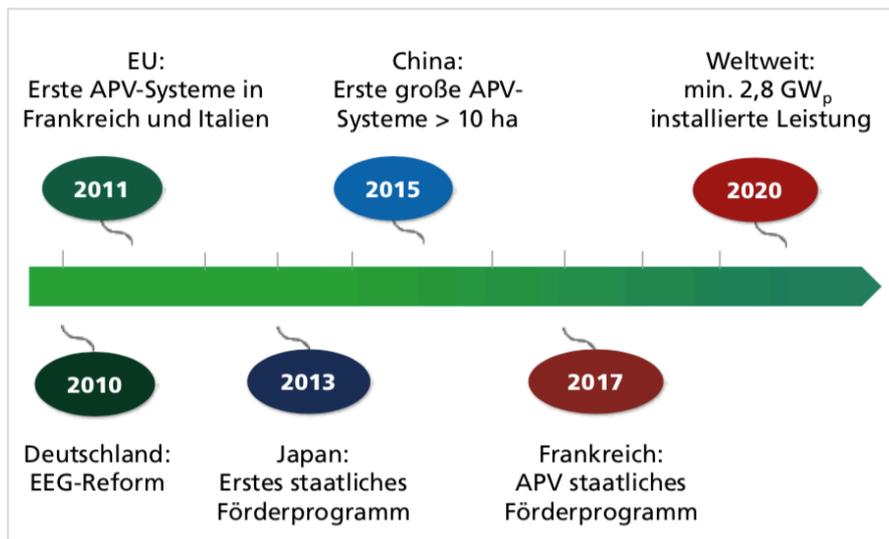


Abbildung 69: Darstellung der Entwicklung der APV von 2010 bis 2020 (Trommsdorff et al., 2020).

In Kombination mit unterschiedlichsten Kulturpflanzen bestehen weltweit Anlagen mit diversen Systemtechniken, bei denen es sich oft um Forschungsanlagen handelt. So befindet sich bspw. in der University of Massachusetts im Crop Research and Education Center (USA) seit 2011 eine Anlage mit 70 Modulen, bei denen die Auswirkungen auf Kulturpflanzen und den Boden untersucht werden (UMass, o.J.). Bei einer APV-Anlage in Minnesota (USA) hingegen soll die Erhöhung der natürlichen Artenvielfalt erhalten werden (Jossi, 2018). In Arizona (USA) hat sich der Wasserbedarf der verwendeten Kulturen (Tomaten) halbiert und die Stromerzeugung lag 5 % höher als bei konventionellen Solaranlagen. Die Modultemperatur lag hier 11°C unter denen der Referenzmodule (Pigott, 2019). In Gewächshäusern in Kalifornien (USA), in denen Tomaten und Gurken angebaut werden, wurden 80 % der Kulturen nicht beeinflusst durch die Überdachung mit violetten und semitransparenten Solarmodulen. Bei 20 % der Pflanzen wurde das Wachstum sogar verbessert (ProduceGrower, 2017). Weitere große Erfolge wurden in den Niederlanden erzielt. Hier wurden leicht-aufgeständerte APV-Anlagen (2,50 m) mit semitransparenten Modulen in Ost-West-Richtung im Beerenanbau getestet. Neben dem Schutz der Kulturen ergaben sich ein geringerer Pflanzenschutzmittelgebrauch (verringertes Krankheitsbefall), sowie die Einsparung von Arbeitszeit und Plastik, da die APV-Anlage das regelmäßige Anbringen von Schutzfolie ersetzt. Zur gleichmäßigen Regenverteilung wurde ein Netz zwischen den Modulen gespannt. Der Landwirt wird die Anlage für den kommerziellen Anbau ausweiten und weitere Tests mit unterschiedlichen Lichtdurchlässigkeiten durchführen.

In Montpellier (Frankreich) befindet sich auf einer Fläche von 860 m² eine APV-Forschungsanlage mit einer Aufständerungshöhe von 4 m. Die Aufständerung besteht hierbei aus Holz, welches mit Drahtseilen gespannt wird. Die Fundamente wurden betoniert. Verwendet wurden Standard-Solarmodule, welche mit größeren Reihenabständen installiert wurden, um so die Lichtdurchlässigkeit zu gewährleisten. Darunter wachsen verschiedene Salatsorten (Abbildung 70). Im Jahr 2018 wurde in Tresserre eine Tracking-APV-Anlage installiert, um damit Weinkulturen zu schützen. Weiterhin werden viele APV-Anlagen in Rebanlagen gefördert und umgesetzt (Trommsdorff et al., 2020).



Abbildung 70: APV-Forschungsanlage an der Universität Montpellier, Frankreich (Dupraz et al., Trommsdorff et al., 2020).

In Lampa, Chile, befinden sich drei APV-Forschungsanlagen des Fraunhofer Instituts mit einer installierten Leistung von je 13 kWp. Hier sind besonders die Landwirt*innen aktiv auf der Suche nach schattenspendenden Installationen zum Schutz der Pflanzen vor Dürre. Durch die synergetischen Potentiale bietet sich die Nutzung von APV hier besonders an. Untersucht werden Brokkoli, Blumenkohl und verschiedene Kräuterpflanzen.

In **Deutschland** bestehen aktuell wenige APV-Anlagen zu Forschungszwecken, aber auch private APV-Anlagen wurden bereits in Betrieb genommen. Eine Auflistung der bestehenden Anlagen in Deutschland ist in Tabelle 11 unter Kapitel 7.7 ersichtlich. Einige dieser Anlagen werden im Folgenden vorgestellt. Weitere Anlagen befinden sich aktuell im Bau bzw. im Genehmigungsprozess.

7.1 Forschungsprojekt Heggelbach

Nach dem Prinzip der **hoch-aufgeständerten Anlagen** wurde in **Baden-Württemberg** bei der **Hofgemeinschaft Heggelbach** im Jahr 2016 unter der Betreuung des Fraunhofer ISE eine APV-Anlage auf 2 ha Acker errichtet. Auf einer APV-Fläche von 3.400 m² wurden hier 194 kWp installiert. Dabei wurde eine lichte Höhe von 5 m, eine Durchfahrtsbreite von 18,4 m und insgesamt eine Anlagenhöhe von 8 m gewählt. Durch die große Dimensionierung der Anlage ist eine Bewirtschaftung mit Standardarbeitsgeräten möglich. Installiert wurden 720 bifaziale Solarmodule mit einer Leistung von jeweils 270 Wp. Heutige Forschungserkenntnisse legen dar, dass die damals verwendete massive Aufständering unnötig hohen Materialaufwand mit sich bringt, der zukünftig kompensiert werden könnte (Trommsdorff et al., 2020).

Unter der APV-Anlage befindet sich eine ökologisch bewirtschaftete Ackerfläche (Hofgemeinschaft Heggelbach ist Demeterbetrieb). Die Anlage gehört zum Forschungsprojekt APV-Resola und wird damit wissenschaftlich betreut. Die für den Hof typische Fruchtfolge wurde beibehalten: Kartoffeln, Sellerie, Winterweizen und Klee gras.

Ein Monitoring erfolgte zu Pflanzenentwicklung, Boden- und Wetterparametern, sowie Energieausbeute. Neben teilweisen Ertragserhöhungen der Ernteprodukte konnte ein Stromertrag von durchschnittlich 200.000 kWh/a erzielt werden (Fraunhofer ISE, 2019). Weitere grafische Darstellungen der Anlage aus verschiedenen Blickrichtungen sind in Abbildung 71 ersichtlich.



Abbildung 71: Visualisierung der APV-Anlage in Heggelbach, (a) aus Blickrichtung Westen, (b) aus Blickrichtung Norden, (c) mit Blick auf die Bauwege, sowie (d) bei der Bewirtschaftung unterhalb der Anlage (Trommsdorff et al., 2020, ©BayWa r.e.)

7.2 Private Praxisanlage in Büren

Eine **leichtaufgeständerte APV-Anlage** wurde 2020 in **Büren**, Nordrhein-Westfalen, errichtet. Auf einem Hektar Fläche wurden hier 750 kWp Leistung installiert. Die Anlage weist eine lichte Höhe von 3 m (Gesamthöhe 3,50 m) auf. Die Bearbeitung unter den 2700 semitransparenten Modulen (75 %) erfolgt durch landwirtschaftliche Geräte mit einer durchschnittlichen Arbeitsbreite von 3 m (Rastermaß der Anlage: 3,5 m Länge, 4 m Breite). Da es sich beim Anbau um Sonderkulturen handelt, ist diese Arbeitsbreite ausreichend.

Die Pflanzbeete wurden als „Dammkultur“ angelegt. Die Ernte erfolgt hierbei manuell. Durch die spezielle Anlegung der Anlage bzw. Fläche mit einem Regenauffang- bzw. Drainagesystem sowie einer Zisterne (bis zu 400.000 l Wasser) und einer **Tröpfchenbewässerung** werden hohe Wassereinsparungen erzielt. Dafür wurde die gesamte Fläche vorher mit 1 %-Gefälle planiert. Das Wasser wird neben der Tröpfchenbewässerung auch mit einer Windmaschine und Nebelsprühern den Pflanzen zurückgeführt. Diese Bewässerungsanlagen werden mit dem erzeugten PV-Strom betrieben. Die Anlage ist eine private Praxisanlage, die errichtet wurde, um die Folgen des Klimawandels zu reduzieren, den Ernteertrag zu steigern und selbstständig Strom zu produzieren. Es wurden zu Beginn **Himbeeren**, **Erdbeeren** und **Heidelbeeren** angebaut. Aktuell wurden die Erdbeeren durch **Apfelbäume** und **Weinreben** ersetzt. Genehmigt wurde das Projekt als „Gewächshaus ohne Wände“. Das Anbauprinzip ist in Abbildung 72 dargestellt.

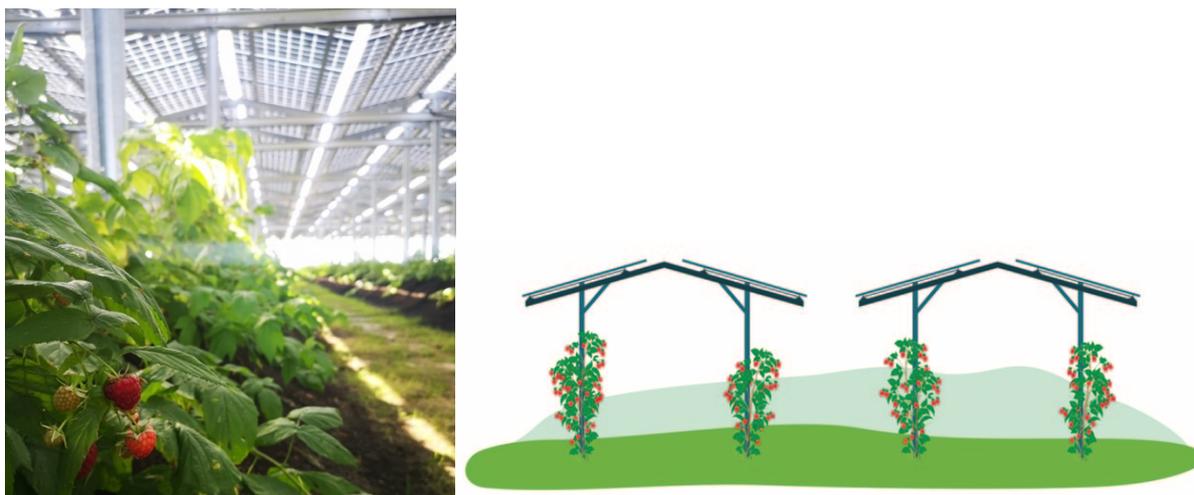


Abbildung 72: Himbeerkulturen unter der APV-Anlage Büren, die Aufständerung wird als Rankhilfe genutzt (Karthaus, 2021) (Vandest & Hemetsberger, 2021).

Die Anlage schützte erfolgreich vor im Mai/Juni auftretenden Spätfrösten, die die Blüten unter der APV-Anlage nicht erreichen. Durch die reduzierte Sonneneinstrahlung sind die Früchte ca. 3 Wochen später reif als Referenzfrüchte. Dadurch werden Erntezeit und Verkaufszeit verlängert. Qualität, Quantität und die Anzahl der geernteten Früchte sind innerhalb und außerhalb

der APV- Anlage vergleichbar oder unter APV besser - es wurde sogar von 20 % erhöhtem Ertrag in der Anlage berichtet (Karthaus, 2021).

7.3 Forschungsanlage Weihenstephan

Eine **nachgeführte APV-Anlage** wurde 2013 in **Freising, Bayern, an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf** errichtet. Sie umfasst eine Fläche von 483 m² mit einer installierten Leistung von 22,5 kWp (Abbildung 73). Die Durchfahrtsbreite beträgt 7m bei einer lichten Höhe von 3,60 m. Installiert wurden 90 Module mit einer Leistung von 245 Wp (Trommsdorff et al., 2020).

Die PV-Module sind in unterschiedlichen Abständen schwenkbar gelagert, um eine landwirtschaftliche Nutzung der darunterliegenden Flächen zu erleichtern und eine Nachführung der PV-Module (Sonnenstand) bzw. Optimierung je nach Pflanzenbedarf zu erlauben. Die Bewirtschaftung der Anlage bei horizontal ausgerichteten Modulen ist in Abbildung 73 ersichtlich.



Abbildung 73: Bewirtschaftung der APV-Anlage in Freising an der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (Beck, o.J.).

Die Nachführung der Anlage erfolgt kalendergesteuert in Richtung Ost-West. Die Abstände sollen Erkenntnisse über den Einfluss der Verschattung auf die Kulturen liefern. Angebaut werden Chinakohl und Spitzkohl (Schindele et al., 2020). Hierbei wurden Ertragsverluste von 50 % und 15 % verzeichnet. Diese wurden u.a. auf die Bodenverdichtung bei Errichtung der Anlage zurückgeführt, sowie auf die Abtropfkante der Module, welche durch die Anbringung von Regenrinnen reguliert wurde. Eine weitere Anlage mit röhrenförmigen PV-Modulen (tubuläre PV) (s. Abbildung 35) hat eine geringere Verschattung und wurde mit Spinat, verschiedenen Salatarten und Kartoffeln getestet (Trommsdorff et al., 2020).

7.4 Privatanlage der Firma Next2Sun in Dirmingen

Eine **vertikale Anlage** befindet sich in **Dirmingen**, Saarland. Diese wurde 2018 auf einer Gesamtfläche von sieben Hektar als europaweit erste bifaziale APV-Anlage in dieser Größenordnung errichtet (Next2Sun GmbH, 2021). Installiert wurden 2.000 kWp PV-Leistung. Das Anlagensystem besteht aus zwei übereinanderliegenden Reihen bifazialer Module, die wechselseitig angeordnet sind, um für eine gleichmäßige Stromproduktion zu sorgen. Die Ausrichtung erfolgt hier in Ost-West-Richtung. Die Höhe der Oberkante der oberen Modulreihe beträgt 3 m. Der Reihenabstand zwischen den Modulreihen ist 10 m.

Die Anlage kann aufgrund des großen Reihenabstandes mit üblichen Landmaschinen zwischen den Modulen befahren werden. Derzeit wird die Fläche mit extensivem Grünland bewirtschaftet. Die Privatanlage liefert somit neben Futtermitteln auch 2.150 MWh/a Strom. Dieses System ließe sich nach Herstellerangaben mit jeder niedrig wachsenden Kulturpflanze wie zum Beispiel Erdbeeren kombinieren und auch als Zaunsystem für die Nutztierhaltung einsetzen. Der große Vorteil dieses Konzepts sind die niedrigeren Kosten für die Installation, da hohe Stahlkonstruktionen entfallen. Alternativen aus Holz können für alle Ständertypen geprüft werden. Weiterhin wurde festgestellt, dass die vertikale Anordnung der Module als Schutz gegen hohe Windlasten geeignet ist. Ein Blick auf die Anlage aus größerer Entfernung, sowie die Bewirtschaftung zwischen den Modulreihen ist in Abbildung 74 und Abbildung 75 ersichtlich.



Abbildung 74: Blick auf die APV-Anlagen Dirmingen aus Vogelperspektive (Next2Sun GmbH, 2021).



Abbildung 75: Bewirtschaftung der APV-Anlage in Dirmingen (Next2Sun GmbH, 2021).

7.5 Forschungsanlage APV-Obstbau in Gelsdorf

Eine **feststehende und nachgeführte APV-Anlage** wurde 2021 am **Bio-Obsthof Nachtwey in Gelsdorf**, Rheinland-Pfalz, errichtet (Abbildung 76). Auf einer Grundfläche von 3.500 m² wurden 258 kWp Leistung installiert. Die Anlage besteht aus 8 Modulreihen mit einer feststehenden Aufständering und einer Länge von jeweils 111 m, sowie aus 3 Reihen nachgeführter Aufständering mit einer Länge von ebenfalls je 111 m. Der Reihenabstand beträgt 5m. Die Nachführung erfolgt einachsrig. Als Module wurden semitransparente Glas-Glas-Module mit einer Lichttransmission von ca. 70 % verwendet.



Abbildung 76: Semitransparente Glas-Glas-Module der APV-Anlage im Apfelanbau in Gelsdorf (Hopf, Fraunhofer ISE, 2021).

Das System ist in Ost-West-Richtung ausgerichtet, um für optimalen Hagel- und Regenschutz zu sorgen. Durch die Anordnung innerhalb des Apfelanbaus erfolgt kein Flächenverlust durch die Pfeiler. Die Versuchsanlage wird unterteilt in vier verschiedene Sektoren:

1. feststehende APV-Anlage (nicht regendurchlässig)
2. nachgeführte APV-Anlage (bei Bedarf regendurchlässig)
3. Referenzanlage mit Folienüberdachung (nicht regendurchlässig)
4. Referenzfläche mit konventionellen Hagelschutznetzen (regendurchlässig)

Die Bewirtschaftung erfolgt unter den Modulreihen. Angebaut werden Apfelbäume. Hierbei soll erforscht werden, inwieweit APV-Anlagen die Schutzfunktionen von Folien und Hagelschutznetzen übernehmen kann. Außerdem werden Erkenntnisse zum Anlagendesign und Ernteertrag gesammelt. Übergeordnetes Ziel des Vorhabens ist die Steigerung der Klimaresilienz im Obstbau. Erste Versuchsergebnisse werden im Jahr 2022 erwartet (Hörnle, et al., 2021; Hopf, 2021).

7.6 Forschungsanlage der Krinner GmbH

Eine **APV-Anlage mit Seilaufhängung** wurde 2020 in **Straßkirchen**, Bayern, errichtet. Hier wurden bisher 35 kWp durch 78 Module mit einer Modulleistung von je 450 Wp installiert (Abbildung 77). Die Bewirtschaftung findet unter der Anlage statt. Angebaut werden Kartoffeln und Mais, ergänzt durch Blühstreifen. Das Fraunhofer ISE betreut das Forschungsvorhaben und forscht vor allem an den mikroklimatischen Verhältnissen, sowie dem Einfluss der APV-Anlage auf die angebauten Kulturen. Zusätzlich wird eine Lebenszyklusanalyse durchgeführt. Das Ziel des Vorhabens besteht darin, die Marktfähigkeit von APV-Anlagen zu steigern und landwirtschaftliche Betriebe optimal zu integrieren (Harlander, 2021; Fraunhofer ISE, o.J.).



Abbildung 77: Forschungsanlage HyPERFarm - Seilaufhängung der Firma Krinner Carport GmbH.

7.7 Zusammenfassung Bestehende Projekte

In Deutschland wurden bis heute **einige Forschungsanlagen, aber auch Praxisanlagen errichtet**. Eine Auflistung der aktuellen Projekte ist in Tabelle 11 ersichtlich. Es lässt sich erkennen, dass Deutschland im Vergleich zu anderen Ländern in der Errichtung von APV-Anlagen noch nicht allzu weit fortgeschritten ist. In Zukunft ist mit dem Bau weiterer Forschungsanlagen zu rechnen, um weitere Erkenntnisse zur Kombination von APV und Landwirtschaft zu erhalten und die Optimierung der APV voranzutreiben. Besonders wird zukünftig aber die Errichtung weiterer Praxisanlagen erwartet, da der voranschreitende Klimawandel eine Steigerung der Resilienz von Pflanzenkulturen notwendig macht, die Nahrungsmittelproduktion gesichert werden muss und eine Einkommensdiversifizierung für die Anbauer*innen geschaffen werden soll. Die Nachfrage aus der Landwirtschaft ist groß.

Tabelle 11: Forschungs- und Praxisanlagen in Deutschland mit verschiedenen Systemtechniken: V=Vertikale Anlage, T=Trackinganlage, HA=Hoch-aufgeständert, LA=Leicht-aufgeständert, SA=Seilauflhängung, R=Solarröhren (eigene Darstellung).

	Gebiet/Region	Leistung [kWp]	System	Angebaute Kulturen	Inbetriebnahme	
Praxisanlagen	1	Warmried (BY)	70	LA	Kartoffeln, Winterweizen, Gerste, Rote Beete, Lauch, Sellerie	2008
	2	Bürstadt (HE)	250		Blumen, bspw. Pfingstrose	2010
	3	Lampertheim Rosengarten (HE)	5.000		Ginseng	2013
	4	Bürstadt (HE)	5.000		Ginseng	2015
	5	Dirmingen (SL)	2.000	V	Weide	2018
	6	Büren (NW)	750	T	Himbeeren, Erdbeeren, Heidelbeeren, Apfel, Wein	2020
	7	Donaueschingen (BW)	4.146	V	Futtermittel	2020
	8	Althegnenberg (BY)	749	T	Sonderkulturen, Beeren	2020
	9	Lüptitz (S)	1.045	T, HA	Nutztierhaltung, Gemüseanbau, Bienenweide	2021
	10	Lüchow (NS)	750	HA	Schnittlauch	2022
Forschungsanlagen	11	Freising (BY)	28	T	Chinakohl, Spitzkohl	2013
	12	Freising (BY)	14	R	Kartoffeln, Salate	2015
	13	Heggelbach (BW)	194	HA	Winterweizen, Gräser, Sellerie, Kartoffeln	2016
	14	Dresden (S)	12,9		Spinat, Erbsen, Bohnen, Radieschen, Mangold	2018
	15	Straßkirchen (BY)	35	SA	Kartoffeln, Mais, Blühstreifen	2020
	16	Düren (NW)	750	T, HA	Acker	2021
	17	Gelsdorf (RP)	258	T	Apfel	2021

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

8 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung

Wie bereits erörtert, bietet die Errichtung einer APV-Anlage zahlreiche Vorteile. Letztendlich entscheidet die Wirtschaftlichkeit über die Investition in eine APV-Anlage und deren langfristige Nutzung. Hierzu erfolgen Optimierungen im energetischen und landwirtschaftlichen Sinne unter Hinzuziehen der ökonomischen Seite. Die finanzielle Umsetzbarkeit steigert die Chance der Realisierung. Die Aufgabe einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung ist es, die erzielten Einsparungen durch den verringerten Energiebedarf bzw. den zusätzlich erzielbaren Gewinn mit der einmalig getätigten Investition und den jährlichen Betriebskosten zu vergleichen. Die Grundlagen der Wirtschaftlichkeitsberechnung sind der **VDI-2067-Reihe „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“** angelehnt. Diese wird im Folgenden näher erläutert und umgesetzt. Weiterhin wird nicht auf die Erträge und Kosten auf Seite der Landwirtschaft eingegangen, da diese von der ausgewählten, spezifischen Kultur pro Anlagentyp abhängt und sich daraus zahlreiche, individuelle Varianten ergeben. Es werden die technisch-ökonomischen Aspekte seitens der PV betrachtet. **Die Wirtschaftlichkeit einer APV-Anlage richtet sich nach der Konzeption, der Größe der bewirtschafteten Ackerfläche, der eingesetzten PV-Technologie und dem Standort und der damit verbundenen jährlichen Sonneneinstrahlung.**

8.1 Berechnungsgrundlage

Die **Wirtschaftlichkeitsberechnung einer APV-Anlage** ist abhängig von zahlreichen Einflussfaktoren, wie bspw. den Investitionskosten, Betriebs- und Wartungskosten, Zinssätzen, Eigenverbrauchs- und Einspeisemenge oder der Energiepreissteigerungsrate. Hierbei werden die benötigten Kosten den Einnahmen und Einsparungen gegenübergestellt. Als **wirtschaftlich sinnvoll** gilt die Anlage, wenn innerhalb der Standzeit der Anlage mehr Einnahmen erzielt als Kosten verursacht werden.

Dabei entstehen bei **APV-Anlagen Gesamtkosten** in verschiedenen Bereichen:

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

Die **Investitionskosten (CAPEX⁷)** setzen sich neben den Kosten für die Anlagenkomponenten auch aus der Installation, Genehmigung und Netzanbindung zusammen. Hierbei gilt es zu beachten, dass die Entfernung zum Einspeisepunkt die Kosten für den Netzanschluss erheblich beeinflusst. Auch die Kosten für Genehmigung sind stark abhängig den politischen Rahmenbedingungen, so vom Genehmigungsprozess, und ggf. erforderlichen Gutachten.

⁷ CAPEX ist ein Akronym für engl. „Capital expenditures“.

Orientiert wurde sich bei den Kosten für Genehmigung und Netzanschluss an Hörnle, et al. (2021). Das Fraunhofer ISE bezieht sich hierbei auf Erfahrungswerte aus vergleichbaren Projekten. Die **Anlagenkomponenten** beinhalten die Module, die Unterkonstruktion, Wechselrichter, elektrische Komponenten und evtl. eine Umzäunung, sowie ggf. ein Regenwassermanagementsystem. Ein großes Investitionsvolumen [nach Wirth (2022) ca. ein Drittel der Gesamtinvestitionen, im Fall von konventionellen PV-Kraftwerken] stellen die verwendeten Module dar. Hinzu kommen die Installationskosten und Standortvorbereitung, sowie die Unterkonstruktion. Damit ergibt sich der sog. CAPEX. Dieser ist meist höher als bei PV-FFA, da die neuartigen Module, die aufwändigere und materialintensivere Aufständigung – je nach Anlagentyp –, und die **noch nicht eingetretenen Skaleneffekte** die Kosten derzeit noch in die Höhe treiben. Die Massenfertigung der Module und die Verwendung von Seilaufhängungen statt massiver Stahlkonstruktionen kann jedoch zukünftig für geringere Investitionskosten sorgen (Hopf et al., 2021). Weiterhin spielt die Anlagengröße eine wichtige Rolle, da auch hier Skaleneffekte auftreten. Je größer die Anlage, desto günstiger werden die Kosten pro Kilowattstunde. Dies bietet vor allem für die in Thüringen typischen weitläufigen Ackerflächen Chancen.

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

Für die ökonomische Berechnung der APV-Anlage werden **weitere Komponenten** benötigt: Der Kalkulationszinssatz i gibt an, mit welchem Zins die einmalige Investitionssumme über den betrachteten Zeitraum (25 Jahre) gleichmäßig verteilt wird. Er wird mit 5 % pro Jahr angenommen. Die Preissteigerungsrate j wird mit 2 % pro Jahr angenommen (Wesselak et al., 2017). Der korrigierte Zinsfaktor z berücksichtigt die Inflation innerhalb des betrachteten Zeitraumes. Aus diesem Wert ist der Annuitätenfaktor a ermittelbar. Wird der Annuitätenfaktor multipliziert mit der Investitionssumme ergibt sich der Kapitaldienst K pro Jahr. Die spezifische Stromerzeugung e wird ermittelt durch die Division der Anlagenleistung durch den voraussichtlichen jährlichen Ertrag aus Landwirtschaft und Stromerzeugung. Die absolute Stromerzeugung pro Jahr entspricht dem voraussichtlichen jährlichen Ertrag. Die Aufteilung des Verbrauchs in Eigenverbrauch bzw. Netzeinspeisung ermöglicht die Ermittlung zusätzlicher Einnahmen. Hierfür gilt es den jährlichen Stromertrag des Nutzers (Landwirt*in, Betrieb, Kommune, etc.) zu betrachten und wie hoch der Anteil an Netzeinspeisung und Eigenverbrauch

ist. Des Weiteren werden die **Betriebskosten (OPEX⁸)** aufgeschlüsselt. Diese setzen sich zusammen aus Wartungsverträgen, Reparaturrücklagen, Kosten für Reinigung, Versicherungen, Überwachung, Verwaltung, Instandhaltung, etc. Die jährliche Flächenpacht ist grundsätzlich niedriger als bei PV-FFA, da die landwirtschaftliche Fläche meist geringere Pachthöhen aufweist als oftmals wertvolle, weniger vorhandene Standorte für PV-FFA. Aktuell dürfen PV-FFA nach EEG21 nur auf versiegelten Flächen, Konversionsflächen, auf Streifen längs von Autobahnen oder Schienenwegen, sowie in einigen Bundesländern (Thüringen nicht) in benachteiligten Gebieten errichtet werden. Weiterhin ist hier durch die Doppelnutzung als Agrarfläche die Sicherheitsüberwachung kostengünstiger, da die Fläche regelmäßig durch Landwirte aufgesucht wird, und im Fall der hoch-aufgeständerten Anlagen eine Umzäunung entfällt (Hörnle, et al., 2021). Da der Rückbau von APV-Anlagen unterschiedlich gehandhabt und evtl. auch ein Repowering der Anlage möglich wäre, werden die Kosten für diesen hier nicht weiter betrachtet.

Nach der Zusammenstellung der benötigten Kosten werden die **Erlöse** betrachtet. Diese ergeben sich aus der Vergütung für die Netzeinspeisung des Stroms und den Kosteneinsparungen durch den Eigenverbrauch. Hierfür gilt es die Strombezugskosten ins Verhältnis zu setzen. Neben dem Eigenverbrauch erhält der Anlagenbetreiber für jede in das öffentliche Stromnetz eingespeiste Kilowattstunde Strom einen Vergütungspreis. Dieser kann entweder per Direktvermarktung, per Einspeisevergütung nach §21 EEG21, per Einspeisung in eine sog. Cloud oder über PPA erzielt werden. Eine **EEG-Vergütung** ist aktuell nur über Sonderausschreibungen möglich, wobei eine Vergütung von 5,9 ct/kWh erhalten werden könnte. Laut Bundesregierung (Referentenentwurf) werden erhöhte Einspeisevergütungen gestaffelt nach Flächengröße von 7,3 bis 12,5 Ct/kWh geplant (Enkhard, 2022).

Weiterhin wäre eine Errichtung auf Streifen längs von Schienenwegen und Autobahnen derzeit ebenfalls EEG-förderfähig. Bei Anlagen über 750 kWp ist bei Netzeinspeisung der Eigenverbrauch nicht zulässig. Eine weitere Möglichkeit wäre die Einspeisung über Stromlieferverträge, wie bspw. **PPA**. Bei diesen wird ein langfristiger Stromliefervertrag zwischen Stromproduzent*innen und Stromabnehmer*innen geschlossen. Die Konditionen (Strommenge, Preise, etc.) werden zwischen den beiden Vertragspartner*innen abgestimmt. Preise werden hier mit ca. 5,5 ct/kWh angegeben (Solar Direktinvest GmbH, 2021). Bei einer **Direktvermarktung** hingegen wird der eingespeiste Strom über das Marktprämienmodell an der Strombörse verkauft (ca. 5 ct/kWh) (Hörnle, et al., 2021). Immer weiter verbreiten sich aktuell auch sog. „**Stromclouds**“. Hier wird die Möglichkeit geboten, überschüssigen Strom bilanziell zu „speichern“ und später wieder abzurufen (Next Kraftwerke GmbH, 2021). In Anbetracht der neuen, politischen Entwicklungen könnte mit einer erhöhten Vergütung für APV-Anlagen gerechnet

⁸ OPEX ist ein Akronym für engl. „operational expenditure“.

werden. Hinzu könnten bei bestimmten Kulturen die Einsparungen durch den Ersatz von Kulturschutzvorrichtungen addiert werden. Außerdem gilt, dass auf dieser Fläche nach wie vor Landwirtschaft betrieben wird und damit ein Doppelnutzen der Fläche erfolgt und zusätzlicher Gewinn erwirtschaftet wird. **Der Vergleich von Betriebskosten, jährlichen Kapitalkosten und den erzielten Erlösen bestimmt damit die Wirtschaftlichkeit.** Durch die APV-Anlage werden jährliche Einsparungen erzielt, welche über die Abschreibungsdauer von 25 Jahren summiert werden. Daraus wird der statische **ROI**⁹ berechnet. Er gibt an, in welcher Zeit die Investitionssumme durch den Erlös relativiert wird. Dividiert werden die Investitionskosten durch die Differenz aus Erlös und Betriebskosten. Neben der positiven finanziellen Situation für den Anlagenbetreiber wird durch die APV-Anlage auch die **Emission von Kohlenstoffdioxid** verringert. **Laut UBA (2021) werden mit einer PVA 0,647 Tonnen CO₂ pro Megawattstunde Strom eingespart.** Damit ergibt sich insgesamt eine CO₂-Einsparung in Tonnen pro Jahr. Die Stromgestehungskosten (LCOE) bezeichnen das Verhältnis der Summe der Investitions- und Betriebskosten und der elektrischen Energieproduktion. Diese werden bezogen auf die wirtschaftliche Nutzungsdauer (Wirth, 2022).

8.2 Wirtschaftlichkeitsbetrachtung anhand eines Beispiels

Da APV-Anlagen eine Vielschichtigkeit an unterschiedlichen Realisierungspotentialen bieten, wird im Folgenden näher auf die Betrachtung der ökonomischen Aspekte eines Fallbeispiels eingegangen. Eine Auflistung verschiedener Systemvarianten, sowie der verwendeten Systemgrößen und -kosten ist in Tabelle 12 aufgeführt. Hierbei gilt es zu beachten, dass die genannten Preise aufgrund der aktuellen Situation stark nach oben abweichen können. Die Auflistung stellt eine Übersicht über die verschiedenen Systeme mit grober Kostenabschätzung dar. Hierbei wurde sich an bisher realisierten Projekten, sowie Herstellerangaben und Expertenmeinungen orientiert, und es wurden keine firmenbezogenen Angebote eingeholt.

Im Ergebnis lässt sich festhalten, dass unter den bestehenden Bedingungen **hoch-aufgeständerte Anlagen nur im großen Maßstab wirtschaftlich sinnvoll** erscheinen. **Bodennahe Anlagen hingegen können auch in kleinerem Maßstab ökonomisch sinnvoll sein.** Eine Einbeziehung der landwirtschaftlichen Erträge ist nicht erfolgt, da diese von der spezifischen Kultur abhängen und sich diese durch Fruchtfolgen im Ackerbau ändern können und sich daraus zahlreiche, individuelle Varianten ergeben. Die Versicherung der landwirtschaftlichen Erträge wird durch den zusätzlichen Schutz der Kulturen abnehmen. Die Verwendung eines Bewässerungssystems bietet die Chance, die Ernteerträge unter geringem finanziellen Einsatz zu erhöhen. Diese Punkte wurden nicht einkalkuliert, gilt es aber bei einer spezifischen Betrachtung in die Kalkulation aufzunehmen.

⁹ ROI ist ein Akronym für engl. „return on investment“.

Ein großer Kostenunterschied zwischen den einzelnen **Systemtechniken** entsteht durch die Module. Hierbei wurden verschiedene Modultypen gewählt, die unterschiedliche Kosten aufweisen. Eine Anpassung sollte immer zugunsten der angebauten Kulturen stattfinden. Auch die Unterkonstruktion beinhaltet verschiedene Möglichkeiten. Hierbei bestehen jedoch noch Unsicherheiten, da je nach Design und potentiellen Skaleneffekten große Preisspannen entstehen. Bei Installation und Standortvorbereitung könnten sich Maßnahmen zum Bodenschutz kostentreibend auswirken, allerdings sind standardisierte Maßnahmen zur Verminderung der Bodenverdichtung bereits Routine (s. Abbildung 46). Die übrigen elektrischen Komponenten können nach aktuellem Stand als vergleichbar angenommen werden.

Bei den **Operationskosten** sind Einsparungen gegenüber PV-FFA zu erwarten. Es wurde angenommen, dass sich die Pachtpreise für APV-Anlagen an denen der landwirtschaftlichen Flächen orientieren. Eine weitere große Kosteneinsparung besteht in der Flächenpflege, die bei APV-Anlagen durch die landwirtschaftliche Nutzung nicht notwendig ist. Unsicherheit besteht in den Annahmen der Reinigungskosten. Je nach Höhe und Nutzung der Anlage und auch Modultyp ist hier mit unterschiedlichem Reinigungsaufwand zu rechnen. Bspw. gibt es zu den Auswirkungen von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln auf die Module noch keine Erfahrungen; dies sollte im Fall der bodennahen Module Beachtung finden – allerdings findet im Grünland generell keine Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln und wenig Düngung statt (Wirtschaftsdünger). Andere Dünger würden von den Anlagen abrieseln oder werden zumeist in den Boden eingebracht (Gülle). Die Verwendung von Tracking-Systemen birgt aufgrund der Beweglichkeit der Teile höhere Operationskosten.

Nicht berücksichtigt wurde bei der Betrachtung, dass der Bau von großen Anlagen (im Ackerbau) auf großen Ackerflächen **Skalierungseffekte** hervorrufen könnte gegenüber kleineren Anlagen (bspw. im Gartenbau). Die Genehmigungskosten sollten dementsprechend mit zunehmender installierter Leistung sinken. Dies gilt es zukünftig zu untersuchen bzw. in der Praxis zu testen. Eine damit verbundene, hohe Investitionssumme könnte bspw. über geeignete Kredite den Landwirt*innen zu Verfügung gestellt werden. Weiterhin wurden mögliche Einsparpotentiale durch den Ersatz von Kulturschutzvorrichtungen (Hagelschutznetze, Folientunnel, etc.) nicht einkalkuliert. Hierbei könnten Kosteneinsparungen von bis zu 8.000 €/ha pro Jahr erzielt werden (Badelt et al., 2020).

Die Kosten in Tabelle 12 wurden unterteilt in **minimale** und **maximale Gestehungskosten**. Für die minimalen Kosten: grau hinterlegte Felder sind zusätzliche Kosten, die nicht unbedingt erforderlich sind, wie bspw. Umzäunung und Bewässerungssystem. Als Anlagenbetreiber*in wird der/die Landwirt*in selbst angenommen, sodass eine Flächenpacht entfällt. Eine Reinigung der Module wird künftig als nicht notwendig eingestuft, da nach der ‚guten fachlichen Praxis‘ kein Abrieb durch Düngemittel und Pflanzenschutzmittel geschehen sollte. Die Genehmigungskosten wurden unter zukünftigen Bedingungen angenommen. Hierbei wird die

Genehmigung vereinfacht und es entstehen keine Kosten für Gutachten. Die APV-Anlage wird in Hofnähe platziert, womit die Kosten geringer sind als bei weiter entfernten Flächen. Angenommen wurde ein Abstand von 2 km. Ein Neubau eines Trafos wird als nicht erforderlich eingeordnet.

Tabelle 12: Kostenauflistung verschiedener APV-Systeme (eigene Darstellung).

	Parameter	Hoch-auf- geständert	Vertikal	Leicht-auf- geständert	Seilauf- hängung	Tra- cking	Faltdach	PV-FFA
Parameter	Modultyp	Standard	bifazial	Standard	Leichtbau	Tracking	Falt-/Leicht- bau	Standard
	Leistungsdichte Stromertrag [kW/ha]	600 ¹	395 ⁶	700 ¹	530 ¹⁰	350	530 ¹⁰	1.000 ¹
	spezifische Stromerzeugung [kWh/kWp]*	1.100 ^{1,2}	1.114 ⁷	1.100 ^{1,2}	923 ¹⁰	75 ⁶	947 ¹⁰	1.100 ¹¹
	Reihenabstand [m]	18	10	4	40	200 ⁵	50	2
	Flächeneinbuße maximal [%]	10 ³	15 ³	10 ³	10 ³	100 ⁵	10 ³	100
	Lichte Höhe [m]	6	<2,1	3	5	15 ⁴	3	1
Investitionskosten [€/kWp]	Module	220 ⁴	250 ²	220 ¹	350	350	900 ^{5,10}	220 ¹
	Unterkonstruktion	400 ¹	200 ¹	220 ¹	75 ⁶	75 ⁶	300 ^{5,10}	100 ¹
	Standortvorbereitung, Installation	300 ^{1,4}	200 ¹	200 ¹²	200 ⁵	200 ⁵	200 ^{5,10}	150 ⁴
	Wechselrichter	100 ¹⁵	100 ⁵	100 ⁵	100 ⁵	100 ⁵	100 ⁵	100 ^{5,6}
	Elektrische Komponenten	15 ⁴	395 ⁶	15 ⁴	15 ⁴	15 ⁴	15 ⁴	15 ⁴
	Netzanbindung	64 ¹²	64 ¹²	64 ¹²	64 ¹²	64 ¹²	64 ¹²	64 ¹²
	<i>Genehmigung</i>	200 ¹²	200 ¹²	200 ¹²	200 ¹²	200 ¹²	200 ¹²	200 ¹²
	<i>Wassersystem</i>	5,33 ⁹	0,0 ⁹	5,33 ⁹	5,33 ⁹	0,0 ⁹	5,33 ⁹	0,0 ⁹
	<i>Umzäunung</i>	0 ⁴	18 ²	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	0 ⁴	18 ²
	CAPEX min [ct/kWh]	5,70	4,25	4,25	4,97	6,29	9,51	3,37
	CAPEX max [ct/kWh]	6,77	5,36	5,31	6,24	7,16	10,75	4,50

	Parameter	Hoch-auf- geständert	Vertikal	Leicht-auf- geständert	Seilauf- hängung	Tra- cking	Faltdach	PV-FFA
Betriebskosten [€/kWp·a]	Versicherungen	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	3 ⁴	2 ⁴	2 ⁴
	Wartung, Reparaturen	1,7 ⁴	1,7 ⁴	1,7 ⁴	1,7 ⁴	2 ⁴	1,7 ⁴	1,5 ⁴
	kaufmännische Betriebsführung	5,5 ⁴	5,5 ⁴	5,5 ⁴	5,5 ⁴	5,5 ⁴	5,5 ⁴	5,5 ⁴
	Reserve	1 ⁴	1 ⁴	1 ⁴	1 ⁴	1 ⁴	1 ⁴	1 ⁴
	Sicherheitsüberwachung	1,44 ⁴	1,44 ⁴	1,44 ⁴	1,44 ⁴	1,44 ⁴	1,44 ⁴	1,8 ⁴
	Monitoring	2,4 ⁴	2,4 ⁴	2,4 ⁴	2,4 ⁴	2,4 ⁴	2,4 ⁴	2,4 ⁴
	Instandhaltung, Flächenpflege	0,08 ⁴	0,08 ⁴	0,08 ⁴	0,08 ⁴	0,08 ⁴	0,08 ⁴	1,6 ⁴
	Verwaltungskosten	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴	2 ⁴
	Sonstiges	1,1 ⁴	1,1 ⁴	1,1 ⁴	1,1 ⁴	1,1 ⁴	1,1 ⁴	1,1 ⁴
	<i>Reinigung</i>	9 ⁵	3 ¹	3 ^{1,9}	9 ⁵	12 ⁵	12 ⁵	3 ¹
	<i>Flächenpacht</i>	1,3 ⁴	1,6 ⁸	1,7 ⁴	1,7 ⁴	1,3 ⁴	1,3 ⁴	3 ¹
	OPEX min [ct/kWh]	1,57	1,55	1,57	1,87	1,36	1,82	1,72
OPEX max [ct/kWh]	2,50	1,96	1,99	3,02	2,39	3,22	2,27	
LCOE	Stromgestehungskosten min [ct/kWh]	7,27	5,79	5,82	6,84	7,65	11,33	5,09
	Stromgestehungskosten max [ct/kWh]	9,27	7,32	7,31	9,27	9,53	13,97	6,76

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

8.3 Ökonomie leicht-aufgeständerter APV-Anlagen

Im Folgenden wird ein Beispiel einer Wirtschaftlichkeitsberechnung einer leicht-aufgeständer-ten APV-Anlage dargelegt. Hierbei handelt es sich um eine beispielhafte Berechnung einer nichtexistierenden Anlage. Es wird die technische Anlage (APV) betrachtet, keine spezifischen Pflanzenkulturen. Damit wurden keine Erträge aus landwirtschaftlicher Seite integriert. Hierbei wurde sich an bisher realisierten Projekten, sowie Herstellerangaben und Expertenmeinungen orientiert, und es wurden keine firmenbezogenen Angebote eingeholt.

Es wird ein Reihenabstand von 4 m und damit eine Flächenleistung von 700 kWp/ha auf einem Hektar angenommen. Durch den geringeren Reihenabstand wird empfohlen, schattentole- rante Kulturen anzubauen. Gewählt wurden Standardmodule mit einer Modulleistung von 400 Wp und einem Wirkungsgrad von 21 %. Der spezifische Stromertrag wird mit 1.100 kWh/kWp angenommen (Trommsdorff et al., 2020). Damit ergeben sich **Investitions- kosten in Höhe von ca. 573.500 €**. Zusammen mit den Betriebskosten von 12.000 €/a erge- ben sich jährliche, finanzielle Lasten von knapp 45.000 € über die Zeit von 25 Jahren. Je nach Anbaukultur würden auch hier die erwirtschafteten Pflanzenerträge hinzugerechnet werden. Bei 100 % Eigenverbrauch des Stroms und gewerblichen Strombezugskosten von ca. 15 ct/kWh (Grave, et al., 2015), ergäbe sich ein Stromertrag von 770.000 kWh/a, wobei dieser standortabhängig ist. Es würden sich ohne Einspeisung jährliche Einsparungen in Höhe von 70.000 € durch die Eigennutzung des Stroms ergeben. Bei Netzeinspeisung gilt es zu prüfen, welche Vergütungsmöglichkeiten bestehen und ob die ökonomische Sinnhaftigkeit auch bei Netzeinspeisung besteht. Damit wäre die **Anlage nach fünfeinhalb Jahren amortisiert**. Die **Stromgestehungskosten betragen 5,82 ct/kWh** (s. Abbildung 78). Es könnten CO₂-Emissi- onseinsparungen in Höhe von knapp 500 t pro Jahr erzielt werden. Weitere Details zur Be- rechnung sind nachfolgend in Tabelle 13 und Tabelle 14 ersichtlich.

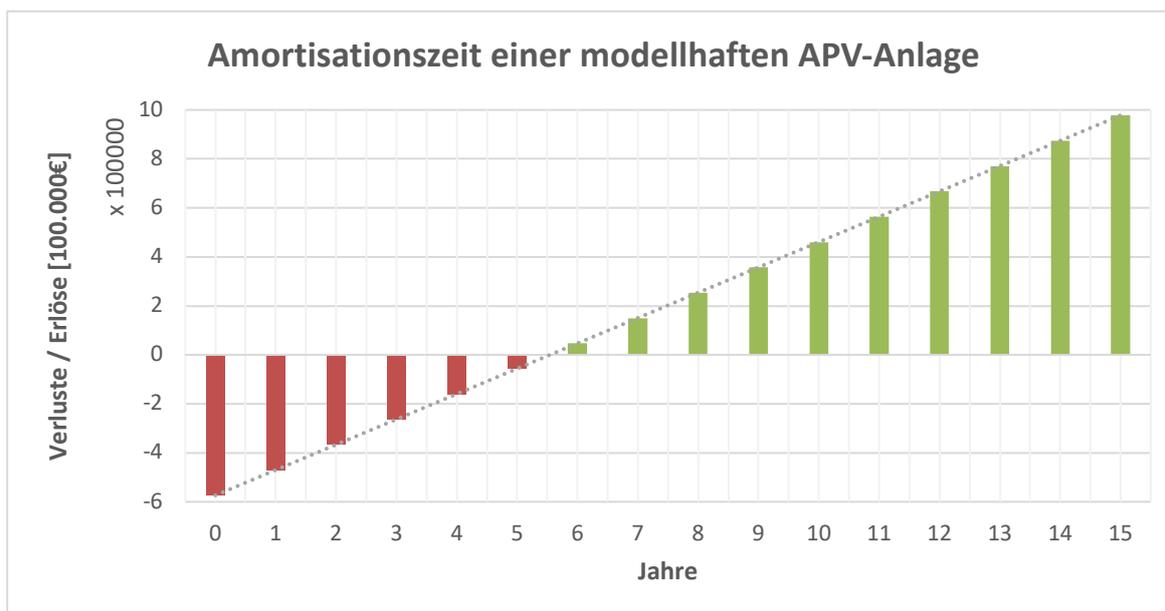


Abbildung 78: Darstellung Amortisationszeit Berechnungsbeispiel (eigene Darstellung).

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

1. PV-Anlagendimensionierung		
Anlagenleistung	700	kWp
Ertrag	770.000	kWh/a
spezifische Stromerzeugung	1.100	kWh/kWp
prozentualer Anteil Netzeinspeisung	0	%
prozentualer Anteil Eigenverbrauch	100	%
Anlagenfläche	10.000	m ²
Anlagenfläche [ha]	1	ha
2. Investitionskosten		
spezifische Investitionskosten	819	€/kWp
Investitionssumme	573.500	€
Kalkulationszins	5	%
Preissteigerung / Jahr	2	%
korrigierter Zinsfaktor	0,02941	%
Annuitätenfaktor	0,05705	%/a
Nutzungsdauer	25	a
Annuität & Kapitaldienst	32.719,39	€/a
3. Erlöse		
Aktueller Strompreis Netto (gewerblich)	15,00	ct/kWh

Tabelle 14: Berechnungsgrundlage der beispielhaften APV-Anlage auf einem Hektar mit Bezug auf Tabelle 12 (eigene Darstellung).

Berechnung leicht-aufgeständerte APV-Anlage	Einheit	
Investition		
Investitionskosten gesamt	T€	574
Tilgungs-/Abschreibungsdauer	a	25
Kalkulationszins	%/a	5
Preissteigerungsrate	%/a	2
Annuitätenfaktor		0,0571
jährlicher Kapitaldienst	T€/a	32,72
technische Daten der Anlage		
Anlagenleistung	kWp	700
spezifische Stromerzeugung pro Jahr	kWh/kWp	1.100
absolute Stromerzeugung pro Jahr	MWh/a	770
prozentualer Anteil Netzeinspeisung	%	0
Netzeinspeisung	MWh/a	0
prozentualer Anteil Eigenverbrauch	%	100
Eigenverbrauch	MWh/a	770
Betriebskosten		
Versicherungen	T€/a	1,40
Wartung, Reparaturen	T€/a	1,19
kaufmännische Betriebsführung	T€/a	3,85
Reserve	T€/a	0,70
Sicherheitsüberwachung	T€/a	1,008
Monitoring	T €/a	1,68
Instandhaltung, Flächenpflege	T €/a	0,056
Inflation	T €/a	0,014
Verwaltungskosten	T €/a	1,40
Sonstiges	T €/a	0,77
Reinigung	T €/a	0
Flächenpacht	T €/a	0
OPEX	T€/a	12,068
Erlöse		
Strombezugskosten Netto	ct/kWh	15,00
Kosteneinsparung Eigenverbrauch	T €/a	115,50
Summe Erlöse	T€/a	115,50
Wirtschaftlichkeit		
Einsparungen / Verlust	T €/a	70,713
ROI statisch	a	5,54
Stromgestehungskosten	ct/kWh	5,82
Rendite	%/a	3,53

Umweltemissionen		
CO ₂ Emissionseinsparung	t/a	498,19
CO ₂ Vermeidungskosten	T€/t/a	1,15

8.4 Fazit

Werden die verschiedenen Systeme verglichen, so wird deutlich, dass die Preise der APV etwas höher als die der PV-FFA liegen (Abbildung 79). Eine Steigerung der Anzahl realisierter APV-Anlagen führt zu Skaleneffekten und damit sinkenden Kosten. Durch die Doppelnutzung der Fläche und besonders durch den Schutz der Kulturen vor negativen Umwelteinflüssen, z.B. Hagel, zu hoher Sonneneinstrahlung, ist der Bau von APV-Anlagen schon heutzutage zur Sicherung der Nahrungsversorgung sinnvoll.

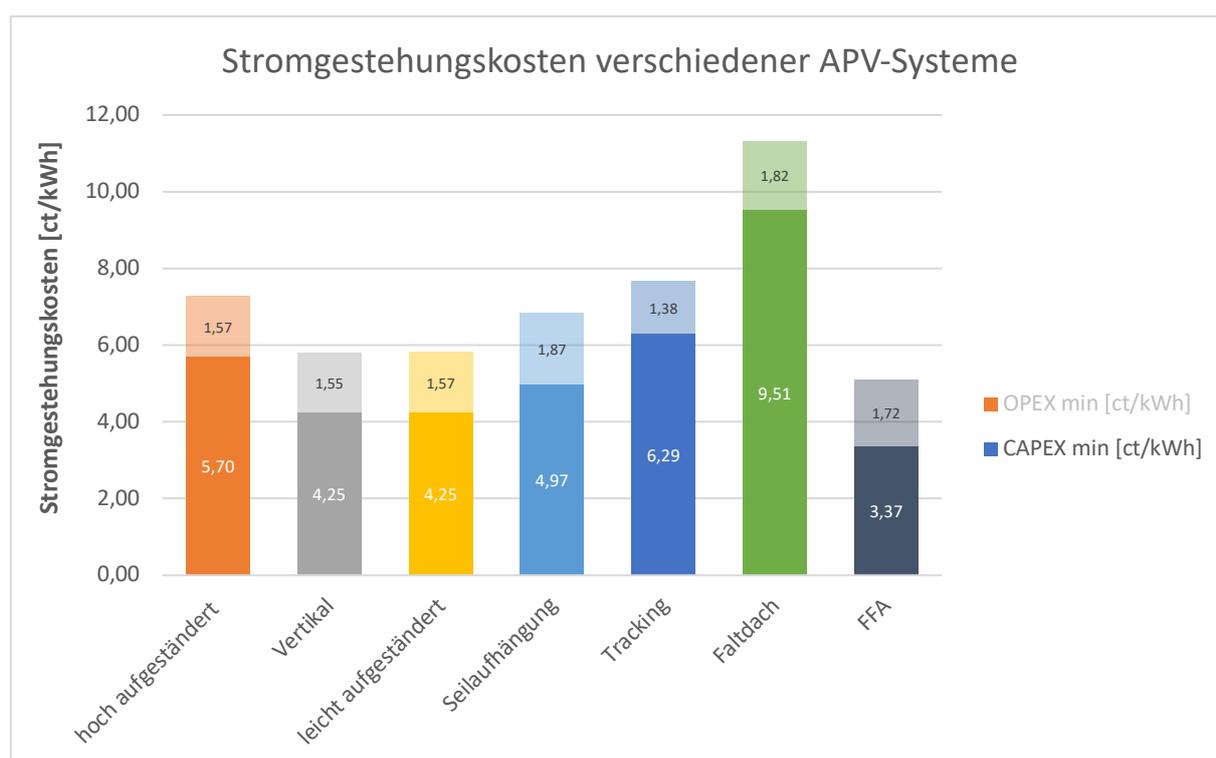


Abbildung 79: Ökonomischer Vergleich der Stromgestehungskosten verschiedener APV-Systeme und PV-FFA auf einem Hektar in Cent pro kWh (eigene Darstellung).

Großes Potential bieten die kostengünstigen Seilaufhängungen an Stelle von massiven Stahl-Aufständern. Inwieweit die Bewirtschaftung und der Pflanzenertrag unter derartigen Anlagen weiter optimiert werden können, gilt es zu erforschen. Auch bleibt es abzuwarten, welche Skaleneffekte über den Zeitverlauf auftreten werden und welche Auswirkungen diese haben.

Einen umfassenden Vergleich **der Kosten, Stromleistung und -ertrag, Stromgestehungskosten** sowie **Investitions- und Betriebskosten** in **Bezug auf Hektar landwirtschaftliche Fläche** zeigt Tabelle 15. Für die Variante ‚leicht-aufgeständert‘ wurde eine kostengünstige Variante für 1 ha Fläche, Netzanbindung ca. 2 km (Kosten ca. 64 €/kWp), ohne Bewässerung, ohne Umzäunung, ohne Flächenpacht, ohne Reinigung, ohne Genehmigungskosten

berechnet. Als günstigste Variante mit umfassender Schutzfunktion für die landwirtschaftlichen Kulturen ergeben sich **Investitionskosten in Höhe von 573.500 €**, sowie **Betriebskosten von 12.068 €**. Die Stromnutzung erfolgt für den Eigenverbrauch. Die modellhafte Anlage weist **eine Amortisationszeit von 5,54 Jahren** auf. Die Faltdachanlage erweist sich als (noch) kostspieligste Variante. Die Variante mit Seilaufhängung ist attraktiv unter den zu erwartenden Förderbedingungen (Vorschlag erhöhter Einspeisevergütungen für APV).

Tabelle 15: Kostenvergleich verschiedener APV-Systeme bezogen auf die Fläche [ha] (eigene Darstellung).

	Hoch-aufgeständert	Vertikal	Leicht-aufgeständert	Seil	Tracking	Faltdach	PV-FFA
Leistung [kWp/ha]	600	395	700	530	875	530	1.000
Ertrag [MWh/ha]	660	435	770	489	1.150	502	1.100
Stromgestehungskosten [ct/kWh]	7,27	5,87	5,82	6,84	7,67	11,33	5,09
Investitionskosten [€/ha]	659.571	327.568	573.500	426.271	1.268.125	837.021	649.286
Betriebskosten [€/a]	10.344	6.810	12.068	9.137	15.873	9.137	18.920
Amortisationszeit [a]	7,44	5,03	5,54	6,64	8,10	12,87	3,94

Spezielle Bedingungen für leicht-aufgeständerte Anlagen s. Text

9 Handlungsempfehlungen für politische Entscheidungsträger

Aus Gesprächen mit Partner*innen aus der Projektierung, Landwirtschaft, Forschungsinstituten, Bürgerenergiegenossenschaften u.a. haben sich für uns die folgenden Handlungsempfehlungen herauskristallisiert:

- Für APV-Anlagen eine **landwirtschaftliche Privilegierung** nach § 35 Abs. 1 BauGB Bauen im Außenbereich festlegen, da APV eine ‚dienende Funktion für die Landwirtschaft‘ besitzt; oder APV-Anlagen wie andere **übliche Kulturschutzmaßnahmen** in der Landwirtschaft behandeln
- Generell **keine Einzelfallbetrachtung**, keine Notwendigkeit für **faunistische und floristische Gutachten**
- **Ausnahmetatbestände** des BNatSchG für landwirtschaftliche Flächen sollten ebenso für APV-Anlagen gelten
- Beschluss des Gesetzgebers für APV-Anlagen: **Priorisierung der Landwirtschaft mit einem Mindestertrag unter APV** zur Unterstützung der Nahrungsmittelversorgungssicherheit
- Verpflichtung für Netzbetreiber zum **Anschluss an das Netz** auch in abgelegenen Gebieten
- **Beschleunigtes Verfahren** zur Einführung der APV in Thüringen und **schneller Netzanschluss** in abgelegenen Gebieten; beides mit Priorisierungen und zeitlichen Obergrenzen
- Erstellung von Leitlinien für eine ‚**gute-APV-Praxis**‘ (u.a. auf Grundlage dieser Studie), z.B. APV-Anlage mit agro-forstlicher Umrandung als strukturgebendes Element im Landschaftsbild
- **Spezielle APV-Ausschreibungen** ohne Deckelung der installierten Leistung als kontinuierliche Ausschreibung und mit erhöhter **EEG-Förderung** für Stromeinspeisung
- Öffnung der **EEG-Innovationsausschreibungen für Grünland**
- **Kein Eigenverbrauchsverbot** des produzierten Stroms bei APV-Anlagen (vor allem auch unter 750 kWp) für den landwirtschaftlichen Betrieb
- **Beibehaltung der Flächenprämien** nach DirektZahlDurchfV für Landwirtschaft unter APV (beschlossen ab 1.1.2023)
- Verknüpfen von **regenerativer Landwirtschaft, Erneuerbarer Energien** und **Biodiversitätsmaßnahmen**, dabei Förderung z.B. über das Kulturlandschaftsprogramm
- **Keine** Notwendigkeit von **Ausgleichsmaßnahmen** für APV; Anerkennung von APV-Anlagen als Kompensationsmaßnahme

- Zusätzliche Subventionierung von **Gemüse- und Obstanbau**, zur Steigerung des Selbstversorgungsgrads mit Unterstützung von APV
- **Finanzierungshilfen für Investition und Betrieb von APV** für Landwirt*innen, Betreiber*innen
- **Freizügigkeit für Landwirte in der Standortwahl** und Gestaltung der APV-Anlagen (Berücksichtigung flexibler Anlagen); APV-Anlage optional auch in Eigentum des Bewirtschafters/Pächters
- **Genehmigungsfreigrenze** für APV für jeden Betriebsstandort der Landwirt*innen
- Kommunen: **gerechte Verteilungsmodelle** auf Landwirtschaftsbetriebe
- **Zur Akzeptanz der APV wird empfohlen:**
 - **Betreibergesellschaften und/oder Renewable Energy Communities** (EU-Verpflichtung für Implementierung in Deutschland) unter Beteiligung von Landwirt*innen, Bürger*innen, regionalen Bürgerenergiegesellschaften, Kommunen
- Aufsetzen eines APV-Förderprogramms „**100 Äcker-Programm**“ für klein- und großflächige APV-Anlagen in Thüringen.

10 Anhang

Anhang 1: Hauptkulturen und Anbaufläche in den jeweiligen Landkreisen Thüringens unter Zuordnung der Agrargebiete (TLS, 2021)

Landkreise / Agrargebiete	Hauptkulturen	Anbaufläche in ha
Altenburger Land / Ostthüringer Lössgebiet	Getreide zur Körnergewinnung	18.579
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	198
	Silomais	3.734
	Leguminosen	438
	Feldgras	651
	Zuckerrüben	1.885
	Erbsen	396
	Süßlupine	62
	Sojabohnen	167
	Winterraps	5.351
	Sonnenblumen	116
	Hanf	197
	Gemüse und Erdbeeren	86
	Brache	331
Baum- und Beerenobst	59	
Eichsfeld / Eichsfeld / Harzvorland, Randlagen Thüringer Becken	Getreide zur Körnergewinnung	22.874
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	486
	Silomais	2.897
	Leguminosen	514
	Feldgras	1.148
	Kartoffeln	18
	Zuckerrüben	548
	Erbsen	116
	Ackerbohne	73
	Winterraps	7.177
	Gemüse und Erdbeeren	6
	Brache	1.418
	Baum- und Beerenobst	5
Eisenach / Randlagen Thüringer Becken	Getreide zur Körnergewinnung	2.586
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	593
	Silomais	
	Leguminosen	104
	Feldgras	92
	Erbsen	152
	Winterraps	874

Landkreise / Agrargebiete	Hauptkulturen	Anbaufläche in ha
Erfurt / <i>Thüringer Becken</i>	Getreide zur Körnergewinnung	8.763
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	117
	Silomais	318
	Leguminosen	373
	Kartoffeln	65
	Zuckerrüben	300
	Erbsen	219
	Winterraps	1.941
	Gemüse und Erdbeeren	100
	Brache	241
	Baum- und Beerenobst	34
Gera / <i>Ostthüringer Lössgebiet</i>	Getreide zur Körnergewinnung	2.205
	Silomais	484
	Leguminosen	110
	Feldgras	76
	Kartoffeln	7
	Zuckerrüben	127
	Erbsen	56
	Winterraps	753
	Gemüse und Erdbeeren	5
	Brache	79
Gotha / <i>Thüringer Becken, Randlagen Thüringer Becken, Thüringer Wald</i>	Getreide zur Körnergewinnung	22.953
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	566
	Silomais	3.869
	Leguminosen	1.096
	Feldgras	212
	Kartoffeln	395
	Zuckerrüben	1.010
	Erbsen	452
	Ackerbohne	341
	Sojabohnen	86
	Winterraps	6.026
	Gemüse und Erdbeeren	19
	Brache	926
	Baum- und Beerenobst	1.038

Landkreise / Agrargebiete	Hauptkulturen	Anbaufläche in ha
Greiz / <i>Ostthüringer Buntsandstein-gebirge, Thüringer Schiefergebirge</i>	Getreide zur Körnergewinnung	18.803
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	137
	Silomais	5.218
	Leguminosen	1.445
	Feldgras	1.524
	Kartoffeln	129
	Zuckerrüben	288
	Erbsen	1.051
	Ackerbohne	58
	Süßlupine	4
	Sojabohnen	22
	Winterraps	6.245
	Sonnenblumen	3
	Hanf	160
	Gemüse und Erdbeeren	15
Brache	428	
Baum- und Beerenobst	33	
Hildburghausen / <i>Thüringer Wald, Südwest-Thüringen</i>	Getreide zur Körnergewinnung	11.334
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	357
	Silomais	3.915
	Leguminosen	1.158
	Feldgras	286
	Kartoffeln	1
	Erbsen	284
	Winterraps	2.046
	Gemüse und Erdbeeren	1
	Brache	337
Baum- und Beerenobst	2	
Ilm-Kreis / <i>Thüringer Becken, Randlagen Thüringer Becken, Ostthüringer Buntsandstein-gebirge, Thüringer Wald</i>	Getreide zur Körnergewinnung	13.285
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	364
	Silomais	2.138
	Leguminosen	1.178
	Feldgras	505
	Kartoffeln	3
	Zuckerrüben	287
	Erbsen	209
	Ackerbohne	307
	Winterraps	3.723
	Brache	627
	Baum- und Beerenobst	6
Jena / <i>Ostthüringer Buntsandstein-gebirge</i>	Getreide zur Körnergewinnung	106
	Leguminosen	10
	Kartoffeln	1

Landkreise / Agrargebiete	Hauptkulturen	Anbaufläche in ha
Kyffhäuserkreis / <i>Thüringer Becken, Eichsfeld, Randlagen Thüringer Becken</i>	Getreide zur Körnergewinnung	37.095
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	921
	Silomais	3.304
	Leguminosen	1.317
	Feldgras	248
	Kartoffeln	51
	Zuckerrüben	1.151
	Erbsen	407
	Ackerbohne	74
	Winterraps	10.393
	Sonnenblumen	275
	Hopfen	118
	Gemüse und Erdbeeren	61
	Brache	1.680
	Baum- und Beerenobst	274
Nordhausen / <i>Thüringer Becken, Eichsfeld</i>	Getreide zur Körnergewinnung	19.165
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	200
	Silomais	2.675
	Leguminosen	488
	Feldgras	592
	Kartoffeln	15
	Zuckerrüben	369
	Erbsen	258
	Ackerbohne	53
	Süßlupine	12
	Winterraps	5.397
	Gemüse und Erdbeeren	10
	Brache	882
Saale-Holzland-Kreis / <i>Ostthüringer Lössgebiet, Ostthüringer Buntsandsteingebiet, Thüringer Becken</i>	Getreide zur Körnergewinnung	15.535
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	351
	Silomais	5.226
	Leguminosen	1.376
	Feldgras	970
	Kartoffeln	43
	Zuckerrüben	86
	Erbsen	272
	Ackerbohne	462
	Gemüse und Erdbeeren	15
	Brache	386
	Baum- und Beerenobst	69

Landkreise / Agrargebiete	Hauptkulturen	Anbaufläche in ha
Saale-Orla-Kreis / Ostthüringer Buntsandsteingebiet, Thüringer Schiefergebirge, Thüringer Wald	Getreide zur Körnergewinnung	20.945
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	207
	Silomais	4.560
	Leguminosen	1.712
	Feldgras	1.849
	Kartoffeln	155
	Zuckerrüben	84
	Erbsen	1.314
	Ackerbohne	258
	Süßlupine	33
	Winterraps	6.823
	Sonnenblumen	3
	Gemüse und Erdbeeren	6
	Brache	438
Baum- und Beerenobst	44	
Saalfeld-Rudolstadt / Randlagen Thüringer Becken, Ostthüringer Buntsandsteingebiet, Thüringer Schiefergebirge, Thüringer Wald	Getreide zur Körnergewinnung	9.030
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	459
	Silomais	2.056
	Leguminosen	2.183
	Feldgras	1.153
	Kartoffeln	28
	Erbsen	64
	Ackerbohne	67
	Winterraps	2.845
	Brache	181
	Baum- und Beerenobst	27
Schmalkalden-Meinungen / Thüringer Wald, Südwest-Thüringen	Getreide zur Körnergewinnung	10.502
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	187
	Silomais	2.964
	Leguminosen	1.057
	Feldgras	473
	Kartoffeln	19
	Zuckerrüben	91
	Erbsen	165
	Winterraps	2.854
Brache	268	

Landkreise / Agrargebiete	Hauptkulturen	Anbaufläche in ha
Sömmerda / Thüringer Becken	Getreide zur Körnergewinnung	34.602
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	1.195
	Silomais	5.799
	Leguminosen	1.402
	Feldgras	352
	Kartoffeln	132
	Zuckerrüben	2.059
	Erbsen	698
	Ackerbohne	12
	Sojabohnen	55
	Winterraps	7.170
	Sonnenblumen	434
	Gemüse und Erdbeeren	194
	Brache	1.299
	Baum- und Beerenobst	364
Sonneberg / Thüringer Wald, Südwest- Thüringen	Getreide zur Körnergewinnung	1.734
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	18
	Silomais	787
	Leguminosen	238
	Feldgras	173
	Kartoffeln	4
Unstrut-Hainich-Kreis / Thüringer Becken, Rand- lagen Thüringer Becken	Getreide zur Körnergewinnung	37.598
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	644
	Silomais	4.788
	Leguminosen	1.605
	Feldgras	605
	Kartoffeln	248
	Zuckerrüben	1.258
	Erbsen	1.014
	Ackerbohne	1.168
	Süßlupine	9
	Winterraps	9.839
	Öllein	40
	Gemüse und Erdbeeren	521
	Brache	1.308
Baum- und Beerenobst	100	

Landkreise / Agrargebiete	Hauptkulturen	Anbaufläche in ha
Wartburgkreis / <i>Thüringer Becken, Randlagen Thüringer Becken, Thüringer Wald, Südwest-Thüringen</i>	Getreide zur Körnergewinnung	16.606
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	321
	Silomais	3.496
	Leguminosen	580
	Feldgras	491
	Kartoffeln	35
	Zuckerrüben	90
	Erbsen	484
	Ackerbohne	165
	Winterraps	4.850
	Sonnenblumen	2
	Gemüse und Erdbeeren	10
	Brache	934
	Baum- und Beerenobst	11
Weimar / <i>Thüringer Becken</i>	Getreide zur Körnergewinnung	626
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	38
	Leguminosen	44
	Feldgras	40
	Kartoffeln	20
	Brache	83
Weimarer Land / Thüringer Becken, Randlagen Thüringer Becken	Getreide zur Körnergewinnung	30.841
	Getreide zur Ganzpflanzenernte	499
	Silomais	4.492
	Leguminosen	1.537
	Feldgras	427
	Kartoffeln	98
	Zuckerrüben	1.451
	Erbsen	1.070
	Ackerbohne	90
	Süßlupine	20
	Winterraps	8.771
	Sonnenblumen	51
	Gemüse und Erdbeeren	9
	Brache	992
Baum- und Beerenobst	82	

Anhang 2: Standort- und Bodenansprüche der Kulturen (Jeangros & Courvoisier, 2019).

	Mögliche Anbauhöhe ¹	Bevorzugter pH-Wert des Bodens					Bevorzugter Bodentyp			Trockenheits-Verträglichkeit ²	
	bis ... m ü. M.	4	5	6	7	8	Leicht	Mittel	Schwer		
Winterweizen	900				█	█		█	█	█	Ø
Sommerweizen	900				█	█			█	█	-
Wintergerste	800				█	█		█			+
Sommergerste	1200				█	█			█		-
Winterhafer	500			█	█	█			█		Ø
Sommerhafer	900			█	█	█			█		-
Winterroggen	1900			█	█	█		█			+
Dinkel	1400			█	█	█			█		Ø
Wintertriticale	800				█	█			█		Ø
Sommertriticale	900				█	█			█		-
Emmer	1900			█	█	█			█		Ø
Körnermais	600			█	█	█			█		-
Silomais	900			█	█	█			█		-
Körnersorghum	500			█	█	█		█			+
Silosorghum	700			█	█	█		█			+
Kartoffeln	1500		█	█	█	█	█	█	█	█	-
Futter- und Zuckerrüben	1000				█	█			█	█	Ø
Winterraps	800				█	█			█		Ø
Sommerraps	800				█	█			█		-
Sonnenblumen	700				█	█			█		-
Hanf	1000				█	█			█		-
Öllein	800			█	█	█	█	█	█		Ø
Faserlein	1500			█	█	█	█	█	█		Ø
Wintererbsen	600				█	█			█		Ø
Sommererbsen	1200				█	█			█		-
Winterackerbohnen	600				█	█			█		Ø
Sommerackerbohnen	700				█	█			█		-
Sojabohnen	500				█	█			█		-
Lupinen	600	█	█	█	█	█			█	█	Ø
Tabak	700			█	█	█	█	█	█		-
Luzerne	1400				█	█			█		+
Kunstwiese	1500			█	█	█			█		Ø
Endivien	700				█	█			█		-
Karotten	500				█	█			█	█	-
Zwiebeln	500				█	█			█		-

¹Die Exposition der Parzelle spielt auch eine große Rolle.

²Die Reaktion der Kultur ist auch von ihrem Entwicklungsstadium beim Auftreten des Wassermangels abhängig.

Legende
 + Gut
 Ø Mittel
 - Schwach

Literaturverzeichnis

- Adeh, E. H., Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018).** Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLoS ONE* 13 (11): e0203256. doi:<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Adomavicius, V. (2021).** Review Of Results Of Agro-Photovoltaic System Implementation In Agriculture. Litauen: Kaunas University of Technology.
- Agora Energiewende. (2022).** Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2021. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2022. Unter Mitwirkung von: Hein, F.; Müller, S.; Lenck, T., Berlin.
- Agrisolar. (2021).** Best Practice Guidelines. SolarPower Europe. Abgerufen am 25. Februar 2022 von <http://www.solarpowereurope.org/wp-content/uploads/2021/05/1721-SPE-Agrisolar-Best-Practices-Guidelines-02-mr.pfd>
- Agroscope. (2021).** Launch of a Multi-Functional Pilot Agrivoltaic Installation by Insolight, Romande Energy and Agroscope. Federal Department of Economic Affairs, Education and Research EAER, Agroscope, Schweiz.
- Al-Agele, H. A., Proctor, K., Murthy, G., & Higgins, C. (2021).** A case study of tomato (*Solanum Lycopersicon* var Legend) production an wanter productivity in agrivoltaic systems. *Sustainability* 2021, 13, 2850. doi:<http://doi.org/10.3390/su13052850>
- area+ GmbH. (o.J.).** area+ Unterkonstruktion. Abgerufen am 17. 12 2021 von <http://area-plus.org/technik.html>
- Axial Structural Solutions. (o.J.).** AxialTracker's Product Range. Abgerufen am 03. 03 2022 von Adaptive Solar Tracking System: <https://www.axialstructural.com/solar-tracker?lang=en>
- Böhm, J. (21. Juli 2021).** Master of Science. Thünen Institut. Pers. Mitt.Telefonat.
- Bündnis 90 / Die Grünen. (2014).** Obstanbaubetriebe nicht im Regen stehen lassen. Abgerufen am 21. 02 2022 von <https://www.gruene-thl.de/natur-umwelt/obstanbaubetriebe-nicht-im-regen-stehen-lassen>
- Badelt, O., Niepelt, R., Wiehe, J., Matthies, S., Gewohn, T., Stratmann, M., . . . Haaren, C. v. (2020).** Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE). Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz; Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH); Institut für Umweltplanung (IUP); Institut für Festkörperphysik (FKP), Hannover.
- Baden-Württemberg Umweltministerium. (2019).** Freiflächensolaranlagen. Stuttgart. Abgerufen am 28. Februar 2022 von https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publikationen/Energie/Handlungsfaden_Freiflaechensolaranlagen.pdf
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckermann, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., & al. (2019).** Agrivoltaics provide mutual benefits across the food-energy-water nexus in drylands. *Nature Sustainability* 2. doi:<https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Barron-Gafford, G., Minor, R., Allen, N., Cronin, A. D., Brooks, A. E., & Pavao-Zuckerman, M. A. (2016).** The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increas local temperatures. *Scientific Reports* 6, 35070. doi:<https://doi.org/10.1038/srep35070>

- Bartels, S. (2019).** Stellungnahme: Reflexionsverhalten Photovoltaikmodule. Viersen: NEW AG.
- Bauernverband. (2021).** Pressemitteilung: Potenziale und Synergien von Agri-Photovoltaik im EEG nutzen Deutscher Bauernverband und Fraunhofer ISE schlagen Optimierung vor.
- Baumgartner, F. (2020).** Performances Indices for Double Use Installations of Foldable PV Generators. ZHAW Zurich University. Winterthur, Schweiz: EUPVSEC IEA Task 13.
- Baywa r.e. (2021).** Partner in der Projektentwicklung. Abgerufen am 11. 02 2022 von Sonnige Aussichten für das Gelingen der Energiewende in Deutschland mit BayWa r.e.: <https://www.baywa-re.de/de/solar/projektierung/projektentwicklung-projektkooperation>
- BayWa r.e. (o.J.).** Erste Agri-PV-Anlage für Äpfel in Deutschland errichtet. Abgerufen am 18. 02 2022 von <https://benelux.baywa-re.com/de/ueber-uns/news/details/erste-agri-pv-anlage-fuer-aepfel-in-deutschland-errichtet>
- BDEW, Statistisches Bundesamt, BMWi, AGE, Statistik-der-Kohlenwirtschaft, & ZSW. (2021).** Bruttostromerzeugung in Deutschland nach Energieträger in den Jahren 2000 bis 2021. Statista.
- Beatty, B., Macknick, J., Mccall, J., Braus, G., & Buckner, D. (2017).** Native Vegetation Performance under a Solar PV Array at the National Wind Technology Center. Contract No. DE-AC36-08GO28308.
- Beck, M. (o.J.).** Weihenstephan Triersdorf. Abgerufen am 28. 12 2021 von Hydrogen and Photovoltaic Electrification on Farm (HyPErFarm): <https://forschung.hswt.de/forschungsprojekt/1539-hyperfarm>
- Beck, M., & al., e. (2017).** Ökologischer Gemüseanbau (3. Ausg.). (R. Eghbal, Hrsg.) Mainz: Bioland Verlags GmbH.
- Beck, M., Bopp, G. G., & al. (2012).** Combining PV and food crops to agrophotovoltaic - Optimization of orientation and harvest. Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. doi: 10.4229/27thEUPVSEC2012-5AV.2
- BFN. (2019).** Bundesamt für Naturschutz. Abgerufen am 28. 02 2022 von Nationaler Vogelschutzbericht 2019: <https://www.bfn.de/vogelschutzbericht-2019>
- Biertümpfel, A. (2021).** Anbautelegramm Echte Kamille. Jena: Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum. Abgerufen am 11. Februar 2022 von http://www.tll.de/www/daten/publikationen/anbautelegramm/at_kamille.pdf
- Birth, T. (2020).** Energie- und Ressourceneffiziente Systeme: Sektorenkopplung durch Systemintegration. Fraunhofer IFF, Fabrikbetrieb und Automatisierung, Magdeburg.
- Blando, F., Gerardi, C., Renna, M., Castellano, S., & Serio, F. (2018).** Characterisation of bioactive compounds in berrie from plants grown unter innovative photovoltaic greenhouses. Journal of Berry Research, Vol. 8, no. 1. doi:10.3233/JBR-170258
- BLE (2018).** Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. Von: Der Selbstversorgungsgrad in Deutschland: https://www.ble.de/SharedDocs/Bilder/DE/BZL/Informationsgrafiken/200324_Selbstversorgungsgrad.html abgerufen
- BMEL. (1999).** Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten (Bundes-BBodSchG § 17 Gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft).

Bundesministerium der Justiz. Abgerufen am 28. Februar 2022 von https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/___17.html

BMWi. (2022). Eröffnungsbilanz Klimaschutz.

BMWK, BMUV, & BMEL. (2022). Ausbau der Photovoltaik auf Freiflächen im Einklang mit landwirtschaftlicher Nutzung und Naturschutz. Berlin: Bundesregierung.

BNE. (2019). Solarparks – Gewinne für die Biodiversität. November: Studie des Bundesverbands Neue Energiewirtschaft (BNE) e.V.

BNE. (2021). Biodiversität in Solarparks. GEO-Tag der Natur 2021. Berlin: Bundesverband Neue Energiewirtschaft.

Brandes, J., Haun, M., Wrede, D., Jürgens, P., Kost, C., & Henning, H. (2021). Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem. Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen. Freiburg.

Brecht Willockx, B. U. (2020). A standardized Classification and Performance Indicators of Agrivoltaic Systems. Research Group Energy & Automation, Faculty of Engineering Technology, KU Leuven, Renewable Energies, Gebroeders De Smetstraat 1, 9000 Gent, Belgium.

Bringewat, D. J. (20. Juli 2021). VBvH: (Von Bredow Valentin Herz Rechtsanwälte) Abgerufen am 13. Oktober 2021 von PV-Anlagen und Landwirtschaft: der VGH Bayern bestätigt die Fördermöglichkeit von Agri-PV: <https://www.vbvh.de/news-detail/pv-anlagen-und-landwirtschaft-der-vgh-bayern-bestaetigt-die-foerdermoeglichkeit-von-agri-pv/>

Bundesnetzagentur. (2022). Brutto-Zubau Wind an Land sowie Wind auf See; davon jeweils auch die Pilotwindenergieanlagen (§ 19 Abs. 1 Nr. 1a MaStRV, § 22a Abs. 1 EEG).

Bundesverband Solarwirtschaft. (26. 05 2021). Übersicht Erlös PV. Abgerufen am 26. 05 2021 von <https://www.solarwirtschaft.de/impressum/>.

BZL. (23. Juni 2020). Bundeszentrum für Ernährung. Abgerufen am 2. Dezember 2021 von <https://www.bzfe.de/lebensmittel/vom-acker-bis-zum-teller/kartoffeln/kartoffelnerzeugung/>

Cantagallo, J.-E., Medan, D., & Hall, A.-J. (2004). Grain number in sunflower as affected by shading during floret growth, anthesis and grain setting. *Field Crops Research*. doi:10.1016/S0378-4290(03)00160-6

Cengiz, M. S., Mamiş, M. S., & Yurci, Y. (2016). Cost Comparison of Constant and Tracking System PV Panels with Stirling Motor-Operated Systems. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*.

Champetier, A., S., N., T.-T. B., Christophe, A., Simonneau, T., Jacquet, O., . . . Payan, J.-C. (2021). How would transient shading provided by dynamic agrivoltaic systems placed above plants influence air temperature? *AgriVoltaics: Conference Paper*.

Choi, C. S., Cagle, A. E., Macknick, J., Bloom, D. E., Caplan, J., & Ravi, S. (2020). Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure. doi:<https://doi.org/10.34944/dspace/1110>

Clearingstelle, E. (o. J.). Abgerufen am 22. Februar 2022 von <https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/haeufige-rechtsfrage/143>

Deboutte, G. (26. April 2021). PV Magazine. Abgerufen am 29. 12 2021 von Solar park built on rough wooden structures comes online in France: <https://www.pv->

magazine.com/2021/04/26/solar-park-built-on-rough-wooden-structures-comes-online-in-france/

Destatis. (2021). Anbaufläche (Feldfrüchte und Grünland): Deutschland, Jahre, Fruchtarten. Wiesbaden. Abgerufen am 06. September 2021 von <https://www-genesis.destatis.de/genesis//online?operation=table&code=41241-0001&bypass=true&levelindex=1&levelid=1626847204889#abreadcrumb>

Deter, A. (2018). Apfelanbau in Deutschland - Kleine Bäume, große Ernte. Münster: Topagrar. Abgerufen am 12. Dezember 2021 von <https://www.topagrar.com/management-und-politik/news/apfelanbau-in-deutschland-kleine-baeume-grosse-ernte-9840572.html>

Deutsches Institut für Normung e.V. (2021). Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung. Berlin: Beuth Verlag.

DHP (o.J.). dhp-technology AG. Solarfaltdach Horizon Ara Chur. Solarstromproduktion über Kläranlage.

Diepenbrock, W., Ellmer, F., & Léon, J. (2016). Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung (4. Ausg.). Stuttgart: Verlag Eugen Ulmer Stuttgart. Abgerufen am 26. Oktober 2021

Dierend, W. (2009). Kulturschutzeinrichtungen im Obstbau (Revised Edition 2009 Ausg.). Verlag Eugen Ulmer.

Dierend, W. (2009a). Probleme des Obstanbaus im Freiland (Bd. Kulturschutzeinrichtungen im Obstbau). Stuttgart.

Dinesh, H., & Pearce, J. (2016). The Potential of Agrivoltaic Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 54. doi:10.1016/j.rser.2015.10.024.

Don, A. (2014). Pressemitteilung: Tiefpflügen für den Klimaschutz? Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei.

Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011a). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 36 (10). doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>.

Dupraz, C., Talbot, G., Marrou, H., Wery, J., Roux, S., Liagre, F., . . . Nogier, A. (2011b). To mix or not to mix: evidences for the unexpected high productivity of new complex agrivoltaic and agroforestry systems. 5th World Congress of Conservation Agriculture Incorporating 3rd Farming Systems Design Conference, (S. 550). Abgerufen am 24. Februar 2022 von https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/70121/5015_WCCA_FSD_2011.pdf?sequence=1&is#page=219

DVT. (2020). Deutscher Verband Tiernahrung e.V. Abgerufen am 21. 02 2022 von Zu viel für Futteranbau in Deutschland? Agrarflächen und ihre Nutzung: <https://www.dvtiernahrung.de/aktuelles-detail/zu-viel-fuer-futteranbau-in-deutschland-agrarflaechen-und-ihre-nutzung>

DWD. (2021). Phänologische Jahreszeiten für Deutschland. Abgerufen am 28. Februar 2022 von <https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimaueberwachung/phaenologie/produkte/phaenouhr/phaenouhr.html>

- Ebert, T., & Müller, C. (2011).** Sind Schadstoffe in Photovoltaik-Freiflächenanlagen eine Gefahr für den Boden? Erneuerbare Energien und Bodenschutz, (S. 4). Freising. Abgerufen am 28. Februar 2022 von https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/iab/dateien/boden_pv_tagung.pdf
- Eisenach-Online. (2021).** 3 Millionen Euro für frostgeschädigte Obst- und Weinbaubetriebe. Abgerufen am 28. Februar 2021 von <https://www.eisenachonline.de/thueringen/3-millionen-euro-fuer-frostgeschaedigte-obst-und-weinbaubetriebe-107491>
- Enkhard, S. (2022).** Erste Details des EEG-„Osterpakets“ bekannt – Viele Verbesserungen für Photovoltaik geplant. Pv magazine. Abgerufen am: 29. Februar 2022. Von: <https://www.pv-magazine.de/2022/02/28/erste-details-des-eeg-osterpakets-bekannt-viele-verbesserung-fuer-photovoltaik-geplant/>
- Essl, F., & Rabitsch, W. (2013).** Biodiversität und Klimawandel . Springer Verlag.
- Esteves, L. (2016).** Coastal squeeze. In: Kennish, M.J. (ed.), Encyclopedia of Estuaries, Dordrecht. Springer.
- European Union. (2019).** Photovoltaic Geographical Information System (PV GIS). Abgerufen am 12. 09 2021 von Online Tool: https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/de/#PVP
- Farack, M., Degner, J. G., Zorn, W., Götz, R., & Marshall, K. (2013).** Winterbraugerste Anbauempfehlung für Mittel- und Süddeutschland. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 18. Oktober 2021 von <http://www.tll.de/ainfo/xpdf/wgbe0813.pdf>
- Farack, M., Degner, J., Jentsch, U., Zorn, W., Götz, R., & Paul, R. (2011).** Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Sommergerste. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 18. Oktober 2021 von <https://docplayer.org/70697116-Leitlinie-sommergerste-thueringer-landesanstalt-fuer-landwirtschaft-zur-effizienten-und-umweltvertraeglichen-erzeugung-von.html>
- Fiener, P., & Wilken, F. (2021).** Bodenerosion in Mitteleuropa - Auswirkungen des Klima- und Landmanagementwandels. In J. Lozán, S.-W. Breckle, D. Graßl, & D. Kasang, Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung (S. 94-100). doi:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.13
- Flisom AG. (2021).** Flexible Solar Module. Abgerufen am 16. 01 2022 von Hocheffiziente Solarenergie: <https://www.flisom.com/de/>
- FNR. (2019).** Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Von Daten und Fakten: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/landwirtschaft.html> abgerufen
- FNR. (2020).** Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Von Flächennutzung in Deutschland: <https://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/landwirtschaft/flachennutzung-in-deutschland.html> abgerufen
- Foken, T., Huwe, B., & Arneith, A. (2021).** Der Energie- und Wasserhaushalt von Böden und ihre klimatische Bedeutung. In J. L. Lozán, S.-W. Breckle, H. Graßl, & D. Kasang, Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung (S. S. 26-35). Warnsignal Klima: Boden & Landnutzung. doi:10.25592/warnsignal.klima.boden-landnutzung.03
- Frühauf, C. (2019).** Klimawandel – Beobachtungen und Prognosen für die Landwirtschaft. Köhlen Kopf bewahren – Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel (S. 342). Darmstadt: KTBL. Abgerufen am 11. November 2021 von https://www.ktbl.de/fileadmin/user_upload/Allgemeines/Download/Tagungen_2019/KTBL-Tagung/KTBL-Tage_2019_Folien.pdf

- Fraunhofer ISE (2019).** Presseinformation – Agrophotovoltaik: hohe Erträge im Hitzesommer. Abgerufen am 22.02.2022 von: https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/presseinformationen/2019/1019_ISE_d_PI_APV_Projektabschluss.pdf
- Fraunhofer ISE. (o.J. a).** Agri-PV. Abgerufen am 12. 02 2022 von Von der Idee zur Umsetzung: <https://agri-pv.org/de/das-konzept/von-der-idee-zur-umsetzung/>
- Fraunhofer ISE. (o.J. b).** HyPERFarm – Hydrogen and Photovoltaic Electrification on Farm. Abgerufen am 12. 02 2022 von <https://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/hyperfarm.html>
- Fritz, B., Horváth, G., Hünig, R., Pereszlényi, A., Egri, A., Guttman, M., & Gomard, G. (2020).** Bioreplicated coatings for photovoltaic solar panels nearly eliminate light pollution that harms polarotactic in- sects. PLOS ONE, 15(12).
- FSU Jena. (2016).** Friedrich-Schiller-Universität Jena, Lehrstuhl für Fernerkundung. Abgerufen am 20. 02 2022 von Satellitengestütztes Phänologiemonitoring in Thüringen: <https://tlubn.thueringen.de/klima/klimawandel-was-tun/klimafolgen/phaenopt>
- Fuhs, M. (22. September 2017).** Pv magazine. Abgerufen am 4. Oktober 2021 von pv magazine award für senkrechte Montage bifazialer Solarmodule: <https://www.pv-magazine.de/2017/09/22/pv-magazine-award-fuer-senkrechte-montage-bifazialer-solarmodule/>
- Gewohn, T., Blankemeyer, S., Vogt, R., Schulte-Huxel, H., Köntges, M., Lim, B., . . . Brendel, R. (2018).** Laminated Textiles enabling Custom Appearance of Building Integrated Photovoltaic Modules. ISFH. Emmerthal: 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition.
- Girth, K. (2004).** Pflanzenmorphologische und -physiologische Untersuchungen zur Toleranz in der Wirt-Parasit-Interaktion *Beta vulgaris* - *Heterodera schachtii*. Bonn: Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. Abgerufen am 8. November 2021 von <https://d-nb.info/974323411/34>
- Goldbeck, J. (o.J.).** GoldbeckSolar. Abgerufen am 06. 02 2022 von Modular Arc System: <https://goldbecksolar.com/de/marcs/>
- Graf, T., Biertümpfel, A., Degner, J., Götz, R., & Zorn, W. (2006).** Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Sonnenblume. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 27. Oktober 2021 von <http://www.tll.de/www/daten/publikationen/leitlinien/sonn0906.pdf>
- Graf, T., Degner, J., Götz, R., Zorn, W., & Ormerod, C. (2013).** Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Winterraps. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 27. Oktotber 2021 von <https://docplayer.org/37961307-Leitlinie-winterraps-zur-effizienten-und-umweltvertraeglichen-erzeugung-von.html>
- Graf, T., Degner, J., Kerschberger, M., & Malarski, O. (2001).** Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Öllein. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 27. Oktober 2021 von <http://www.tll.de/ainfo/archiv/oell0801.pdf>
- Graf, T., Reinhold, G., Biertümpfel, A., & Zorn, W. (2005).** Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Faserhanf. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 27. Oktober 2021 von <http://www.tll.de/ainfo/pdf/hanf0805.pdf>

- Grave, K., Hazrat, M., Boeve, S., Blücher, F. v., Bourgault, C., Bader, N., . . . Großmann, A. (2015).** Stromkosten der energieintensiven Industrie Ein internationaler Vergleich. Fraunhofer ISI, Ecofys, GWS. BMWi.
- Guddat, C., Degner, J., Zorn, W., Reich, J., Götz, R., & Richter, G. (2006).** Leitlinien zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Körnererbsen. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 2. November 2021 von <http://www.tll.de/ainfo/archiv/kerb0107.pdf>
- H2arvester. (2022).** Harvesting hydrogen on agricultural land while maintaining agricultural production. Abgerufen am 14. 05 2022 von <https://www.h2arvester.nl/?lang=en>
- Hallmann, C., Sorg, M., Jongejans, E., Siepel, H., Hofland, N., & Schwan, H. (2017).** More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. PLoS ONE 12(10): e0185809.
- Harlander, A. (2021).** Krinner Carport GmbH. Pers. Mitteilung – Email vom 26.07.2021
- Herden, C., Rasmus, J., & Gharadjedaghi, B. (2006).** Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen. GfN - Gesellschaft für Freilandökologie . BfN - Bundesamt für Naturschutz.
- Hildebrandt, H. (2021).** Ökostrom Saar GmbH. Pers. Mitteilung, Email vom 03.05.2021
- Hietel, E.; Reichling, T.; Lenz, C. (2021).** Leitfaden für naturverträgliche und biodiversitätsfreundliche Solarparks - Maßnahmensteckbriefe und Checklisten. Technische Hochschule Bingen.
- Hoeffelner. (2017).** Hoeffelner. Abgerufen am 16. Dezember 2021 von <https://www.hoeffelner.info/anbaumethoden-fuer-erdbeerpflanzen/>
- Hopf, M. (2021).** Agri-Photovoltaik im Apfelanbau. FH Erfurt, Fraunhofer ISE. Pers. Mitteilung.
- Hopf, M. (2021).** Agri-Photovoltaik im Apfelanbau Eine Wirtschaftlichkeitsanalyse am Fallbeispiel eines Bio-Obsthofes in Rheinland-Pfalz. Masterarbeit, Fachhochschule Erfurt, Fraunhofer ISE.
- Horn, A. (2022).** Positionspapier des Thüringer Bauernverbandes zum Photovoltaikausbau in Thüringen. - Unten Ackern, oben Strom: Flächen schützen und wirtschaftliche Potentiale der Agri-Photovoltaik nutzen. Thüringer Bauernverband.
- Höhne, F. (2005).** Aktuelle Holunder-Forschungsergebnisse aus Gülzow. Gülzow-Prüzen: Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern. Abgerufen am 16. Dezember 2021 von <https://docplayer.org/24880759-Aktuelle-holunder-versuchsergebnisse-aus-guelzow.html>
- Hörnle, O., Riedelsheimer, J., Trommsdorf, M., & al, e. (2021).** Durchführbarkeitsstudie zur Ermittlung möglicher Forschungs- und Demonstrationsfelder für Agri-Photovoltaik in Baden-Württemberg. Freiburg im Breisgau: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, ISE. Abgerufen am 11. Februar 2022 von <https://agri-pv.org/dokumente/49/Durchf%C3%BChrbarkeitsstudie.pdf>
- Hortipendium. (2012).** Hortipendium. Abgerufen am 16. Dezember 2021 von <http://www.hortipendium.de/Pflaumenanbau>
- Hudelson, T., & Lieth, J. H. (2021).** Crop production in partial shade of solar photovoltaic panels on trackers. Davis (USA: AIP Conference Proceeding 2361, 080001. doi:<https://doi.org/10.1063/5.0055174> 2361, 080001

- IBC Solar (2013).** IBC SOLAR finalisiert Solarparks für WVE GmbH Kaiserslautern. Abgerufen am 06. März 2022 von: <https://www.ibt-solar.de/unternehmen/presse/presseartikel/news/detail/News/ibt-solar-finalisiert-solarparks-fuer-wve-gmbh-kaiserslautern/>.
- Idelberger, C. (2011).** Sonnenlicht-induzierte Chlorophyll-Fluoreszenz im Tagesgang in Nutzpflanzenbeständen. München: Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landwirtschaft und Umwelt der Technischen Universität München. Abgerufen am 8. November 2021 von <https://mediatum.ub.tum.de/doc/992825/992825.pdf>
- Ionita, M., Nagavciuc, V., Kumar, R., & Rakovec, O. (2020).** On The Curious Case Of The Recent Decade, Mid-Spring Precipitation Deficit In Central Europe. *Climate and Atmospheric Science* 3.
- Jacobs, A., Flessa, H., Don, A., Heidkamp, A., Prietz, R., Dechow, R., . . . al, e. (2018).** Landwirtschaftliche genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut. doi:10.3220/REP1542818391000
- Jeanros, B., & Courvoisier, N. (2019).** Optimale Fruchtfolgen im Feldbau. Schweiz: Agridea & Agroscope. Abgerufen am 28. Februar 2022 von https://www.agrarforschungschweiz.ch/wp-content/uploads/2019/12/2019_0708_2488.pdf
- Jentsch, U., Zorn, W., Marschall, K., Götz, R., & Degner, J. (2016).** Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Winterroggen. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 18. Oktober 2021 von http://www.tll.de/www/daten/publikationen/leitlinien/ll_wro.pdf
- Jossi, F. (2018).** ScientificAmerican. Abgerufen am 28. 11 2021 von Solar Farms Produce Power—and Food: <https://www.scientificamerican.com/article/solar-farms-produce-power-and-food/>
- Jung, J. (24. 11 2020).** Solarenergie Förderverein Deutschland e.V. SFV. Abgerufen am 12. 01 2022 von Agro-, Agrar oder Agri-Photovoltaik?: <https://www.sfv.de/agro-agrar-oder-agri-photovoltaik>
- Kümpel, N. (2022).** WegaTech. Abgerufen am 02. 03 2022 von Die richtige Ausrichtung einer PV-Anlage: <https://www.wegatech.de/ratgeber/photovoltaik/planung-und-installation/ausrichtung/>
- Käferle, P. (2021).** Bericht zu einer Markt- und Potentialanalyse von Agroforst- und Agri-Photovoltaik-Anbausystemen mit Sonderkulturen in Mittelthüringen. Erfurt: Thüringer Landesgesellschaft mbH. Abgerufen am 28. Februar 2022
- Kalmbach, J. (2021).** Beispiele für Agri-Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer ISE. Online Veranstaltung: Netzwerk Zukunftsraum Land.
- Karthus, F. (05. Mai 2021).** Landwirt mit eigener APV-Anlage. Pers. Mitteilung - Email.
- KNE. (2021).** Kriterien für eine naturverträgliche Standortwahl für Solar-Freiflächenanlagen - Übersicht über die Einschätzung der Eignung verschiedener Flächentypen. Berlin. Abgerufen am 28. Februar 2022 von https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE_Kriterienkatalog-zur-naturvertraeglichen-Standortsteuerung-PV-Freiflaechenanlagen.pdf
- Konrad, P., & Knapo, L. (2011).** Kulturblatt Rhabarber. Arenenberg: Bildungs- und Beratungszentrum Arenenberg. Abgerufen am 29. November 2021 von

<https://www.yumpu.com/de/document/read/21214855/rhabarber-kulturbblatt-und-beratungszentrum-arenenberg>

- Korrmann, ewind Betreiber- und Vertriebs- GmbH.** Pers. Mitteilung Volker Korrmann.
- Krinner Carport GmbH. (26. 07 2021).** Krinner Carportsysteme. Abgerufen am 26. 07 2021 von Leitbild: <https://www.krinner-solar.com>
- Kutter, C., Bläsi, B., Wilson, H. R., Kroyer, T., Mittag, M., Höhn, O., & Heinrich, M. (2018).** Decorated building-integrated Photovoltaic Modules: Power loss, Color Appearance and Cost Analysis. Fraunhofer ISE, Freiburg.
- LfU. (2013).** Planung und Errichtung von Freiflächen - Photovoltaikanlagen in Trinkwasserschutzgebieten . Augsburg: Bayerisches Landesamt für Umwelt.
- Lieder, K., & Lumpe, J. (2012).** Vögel im Solarpark – eine Chance für den Artenschutz? Auswertung einer Untersuchung im Solarpark Ronneburg „Süd I“. Fa. Regner & Söldner GbR.
- LWG. (2014).** Erdbeeren. Veitshöchheim: LWG. Abgerufen am 16. Dezember 2021 von https://www.lwg.bayern.de/mam/cms06/gartenakademie/dateien/erdbeeren_infoschrift_3182.pdf
- März, B., & Schünemann, S. (2021).** Solaranlagen: Chancen für Naturschutz, Erfordernis für Klimaschutz. DNR. Abgerufen am 28. Februar 2022 von <https://www.dnr.de/themen/positionen/solaranlagen-chance-fuer-naturschutz-erfordernis-fuer-klimaschutz>
- Makaronidou, M. (2020).** Assessment in the local climate effects of solar parks. Lancaster University. Doi:<https://doi.org/10.17635/lancaster/thesis/1019>
- Malu, P. R., Sharma, U. S., & Pearce, J. (2017).** Agriphotovoltaic potential on grape farms in India. Sustainable Energy Technologies and Assessments 23. Doi:10.1016/j.seta.2017.08.004
- Marrou, H., Dufour, L., & Wery, J. (2013b).** How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil crop system? European Journal of Agronomy 50. Doi:<http://doi.org/10.1016/j.eja.2013.05.004>
- Marrou, H., Guillion, L., Dufour, L., Dupraz, C., & Wery, J. (2013a).** Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? Agricultural and Forest Meteorology.177. doi:10.1016/j.agrformet.2013.04.012
- Marrou, H., Wery, L., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013c).** Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. (44), S. 54-66. Doi:<https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003>
- Marx, A. (2019).** Helmholtz – Zentrum für Umweltforschung. Abgerufen am 22. 02 2022 von Dürremonitor Deutschland: <https://www.ufz.de/index.php?de=37937>
- Maslaton, M., & Müller, M. (28. September 2021).** Freiflächenphotovoltaik in Kommunen. Seminar der ThEGA, Erfurt.
- Megasol Energie AG. (09 2018).** megasol. Abgerufen am 29. 12 2021 von Bifacial Module – das zweite Gesicht : <https://megasol.ch/bifacial-module-das-zweite-gesicht/>
- Michel, H. (2022).** Agrarmeteorologie Thüringen. (TLLLR, Herausgeber) Abgerufen am 12. Februar 2022 von Agrarmeteorologie Thüringen: <https://www.wetter-th.de/Agrarmeteorologie-TH/Wetterdaten/Stationskarte>

- Miskin, C. K., Li, Y., Perna, A., Ellis, R. G., Grubbs, E. K., Bermel, P., & Agrawal, R. (2019).** Sustainable co-production of food and solar power to relax land-use constraints. *Nature Sustainability* 2(10), 972–980. .
- Monn, T. (2021).** Solarfaltdach HORIZON - Projektskizze für den Parkplatz. Zizers Schweiz: dhp technology AG.
- Montag, H., Parker, G., & Clarkson, T. (2016).** The effects of solar farms on local biodiversity: a comparative study. Clarkson and Woods & Wychwood Biodiversity. ISBN 978-1-5262-0223-9
- Moore-O'Leary, K., Hernandez, R., Johnston, D., Abella, S., Tanner, K., Swanson, A., . . . Lovich, J. (2017).** Sustainability of utility-scale solar energy – critical ecological concepts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(7), S. 385-394.
- NABU. (2020).** News 2020 Ernteauffälle in der Landwirtschaft sind weitestgehend hausgemacht. Abgerufen am 22. 02 2022 von <https://thueringen.nabu.de/news/2020/28742.html>
- NABU. (o. J.).** Laut werden für den Feldhamster! Abgerufen am 28. Februar 2022 von <https://www.nabu.de/natur-und-landschaft/landnutzung/landwirtschaft/artenvielfalt/lebensraum/27829.html>
- NDR. (2021).** Pilotprojekt sorgt für Schnittlauch und Solarstrom. Abgerufen am 11. Februar 2022 von https://www.ndr.de/nachrichten/niedersachsen/lueneburg_heide_unterelbe/Pilotprojekt-sorgt-fuer-Schnittlauch-und-Solarenergie,agrosolar100.html
- Neidlein, H. (2020).** EnergieZukunft. Abgerufen am 01. 03 2022 von Himbeeren unter Solarmodulen statt unter Folientunneln: <https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/solar/himbeeren-unter-solarmodulen-statt-unter-folientunneln/>
- Neumann, H. (2020).** Top Agrar Online. Abgerufen am 02. 03 2022 von Module auf Blühstreifen - Photovoltaik, Artenschutz und Landwirtschaft auf einer Fläche: <https://www.topagrar.com/energie/news/photovoltaik-artenschutz-und-landwirtschaft-auf-einer-flaeche-12343350.html>
- Next Kraftwerke GmbH. (2021).** Next Kraftwerke. Abgerufen am 23. 02 2022 von Power Purchase Agreements: <https://www.next-kraftwerke.de/wissen/power-purchase-agreement-ppa>
- Next2Sun GmbH. (April 2021).** Next2Sun. (Next2Sun) Abgerufen am 31. Juli 2021 von Referenzen - Agri-PV-Anlagen: <https://www.next2sun.de/referenzen/>
- Nier, H. (2018).** Statista. Abgerufen am 28. 02 2022 von Trockenheit verursacht größte Ernteschäden: <https://de.statista.com/infografik/14926/schadenaufwand-durch-wetterextreme/>
- Nordberg, E. J., Caley, M. J., & Schwarzkopf, L. (2021).** Designing solar farms for synergistic commercial and conservation outcomes. *Solar Energy* 228. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.09.090>
- NCSL (2020).** National Conference of State Legislatures. Webinar. Solar on agricultural lands – preserving pollinator habitat and soil health. Abgerufen am: 26.02.2022 von: <https://www.ncsl.org/Portals/1/Documents/standcomm/scnri/Solar-Webinar-2020.pdf>
- Obergfell, T., Bopp, G., Goetzberger, A., Reise, C., & Schindele, S. (2013).** Agrophotovoltaik - Landwirtschaft unter Photovoltaikanlagen. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE. Abgerufen am 16. Februar 2022 von

<https://docplayer.org/34266452-Agrophotovoltaik-landwirtschaft-unter-photovoltaikanlagen.html>

- Oleskewicz, K. (2020).** The Effect of Gap Spacing Between Solar Panel Cluster on Crop Biomass Yields, Nutrients, and the Microenvironment in a Dual-Use Agrivoltaic System. Master Thesis. doi:<https://doi.org/10.7275/15996616>
- Onaga, G., Wydra, K. (2021):** Recent Understanding on Molecular Mechanisms of Plant Abiotic Stress Response and Tolerance. In: Molecular Breeding in Wheat, Maize and Sorghum: Strategies for Improving Abiotic Stress Tolerance and Yield. M. Anwar et al. (eds.). CABI Publishing. Pp. 1-23
- Onaga, G., Wydra K. (2016a).** Advances in Plant Tolerance to Abiotic Stresses. In: Plant Genomics ·Ed. Ibrokhim Y. Abdurakhmonov. InTech. Pp.167-227. <http://dx.doi.org/10.5772/64350>.
- Onaga, G., Wydra K. (2016b).** Advances in Plant Tolerance to Biotic Stresses. In: Plant Genomics. Ed. Ibrokhim Y. Abdurakhmonov. InTech. Pp. 229-272. <http://dx.doi.org/10.5772/64351>.
- Outhwaite, C., McCann, P., & Newbold, T. (2022).** Agriculture and climate change are reshaping insect biodiversity worldwide. Nature 605, 97–102.
- Parker, G. E., & McQueen, C. (2013).** Can Solar Farms Deliver Significant Benefits to Biodiversity? Preliminary Study July-August 2013, unpublished report. Abgerufen am 28. Februar 2022 von <https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/assets.lightsource-re.com/2020/06/Solar-and-Biodiversity-Report-Parker-McQueen-2013d.pdf>
- Peschel, T. (2010).** Solarparks – Chancen für die Biodiversität Erfahrungsbericht zur biologischen Vielfalt in und um Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Berlin: Agentur für Erneuerbare Energien e. V.
- Peyker, W., Degener, J., Zorn, W., & Reinhard, G. (2013).** Leitlinien zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Silomais. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 26. Oktober 2021 von http://www.tll.de/www/daten/publikationen/leitlinien/ll_smais.pdf
- Peyker, W., Degner, J., Zorn, W., & Reinhard, G.. (2016).** Leitlinien zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von kleinkörnigen Leguminosen und deren Grasmengen. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 26. Oktober 2021 von http://www.tll.de/www/daten/publikationen/leitlinien/ll_kleg.pdf
- Pfeiffer, B. (2020).** Sauerkirschen im ökologischen Anbau - Erfahrungen und Potential, Teil 1. Weinsberg: Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau. Abgerufen am 16. Dezember 2021 von <https://www.foeko.de/wp-content/uploads/2021/01/4-2020-Steinobst-Sauerkirschen.pdf>
- Phoenix Contact GmbH & Co. KG. (07. Juni 2021).** Beeren aus Büren. UPDATE - Das Innovationsmagazin. Abgerufen am 10. 02 2022 von: <https://update.phoenixcontact.com/energy/regenerative/beeren-aus-bueren/>
- Photovoltaik.EU. (2020).** Stuttgart fordert: Agriphotovoltaik soll ins EEG. Abgerufen am 29. 02. 2022 von <https://www.photovoltaik.eu/landwirtschaft/stuttgart-fordert-agriphotovoltaik-soll-ins-eeeg>
- Pigott, S. (2019).** University of Arizona - News. Abgerufen am 28. 11 2021 von Agrivoltaics Proves Mutually Beneficial Across Food, Water, Energy Nexus: <https://news.arizona.edu/story/agrivoltaics-proves-mutually-beneficial-across-food-water-energy-nexus>

- Popp-Hackner, V., & Popp, G. (2014).** PV-Anlage unterstützt Artenvielfalt. Landschaftsplanungsbüro "Land in Sicht". Wiener Wildnis.
- Porsche AG. (08. 12 2017).** Newsroom Porsche. Abgerufen am 29. 12. 2021 von Sylt unter Strom: <https://newsroom.porsche.com/de/unternehmen/porsche-sylt-solar-photovoltaik-carport-plug-in-hybrid-initiative-handelsbetriebe-panamera-4-e-hybrid-nachhaltigkeit-14625.html>
- ProduceGrower. (2017).** University of California - Santa Cruz. Abgerufen am 28. 11 2021 von UC Santa Cruz grows first tomatoes and cucumbers in solar greenhouses: <https://www.producegrower.com/article/uc-santa-cruz-solar-greenhouses/>
- Rösch, C., Gölz, S., Hildebrand, J., Venghaus, S., & Witte, K. (2019).** Transdisziplinäre Ansätze zur Erforschung gesellschaftlicher Akzeptanz. Energy Research for Future - Forschung für die Herausforderungen der Energiewende.
- Rösrath. (o.J.).** Ablaufschema Bebauungsplanverfahren. Abgerufen am 04. Januar 2022 von <https://www.roesrath.de/ablaufschema-bebauungsplanverfahren.pdf?forced=true>
- Raab, B. (2015).** Erneuerbare Energien und Naturschutz - Solarparks können einen Beitrag zur Stabilisierung der biologischen Vielfalt leisten. Anliegen Natur, Heft 37 (1), 11. Abgerufen am 28. Februar 2022 von https://www.anl.bayern.de/publikationen/anliegen/doc/an37106raab_2015_solarfelder.pdf
- Ravishankar, E., Charles, M., Xiong, Y., Ade, H., Sederoff, H., & O'Connor, B. (2021).** Balancing crop production and energy harvesting in organic solar-powered greenhouses. Cell Reports Physical Science 2, 100381.
- Regionale Planungsgemeinschaft Mittelthüringen. (2019).** Regionalplan Mittelthüringen.
- Reinhold. (2015).** Thüringer Bioenergieprogramm. TLL. Abgerufen am 28. Februar 2022 von www.thueringen.de/th9/tll
- Ressar, K. (2020).** Agrophotovoltaik in Österreich: Potenziale, Hindernisse und Akzeptanzprobleme aus der Sicht relevanter Akteurinnen und Akteure. . Wien: Universität für Bodenkultur.
- Rodriguez, J. (18. 10 2014).** Solar Choice. Abgerufen am 15. 01 2022 von Japanese PV installers choosing wooden racking for solar panel ground-mounting: <https://www.solarchoice.net.au/blog/news/japanese-firms-choose-wooden-racking-for-solar-panel-ground-mounting-081014/>
- Rotec. (o.J.).** Rotec GmbH Berlin. Abgerufen am 01. 03 2022 von Bodenschutzplatte Typ varioMAT 1+ (vormals eMat): <https://www.rotect-berlin.de/bodenbewaehrung/mobile-fahrstrassen/>
- Südzucker-AG, & TLL, V.-S.-T.-Z.-e. (2008).** Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Zuckerrüben. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 28. Oktober 2021 von <http://www.tll.de/www/daten/publikationen/leitlinien/zuck0908.pdf>
- Schünemann, S., Barthel, P., Schrader, T., Ott, J., & Maatsch, H. (2021).** Solaranlagen: Chance für Naturschutz, Erfordernis für Klimaschutz – Forderungen der Umweltund Naturschutzorganisationen für einen naturverträglichen Ausbau. DNR; DUH; Germanwatch, Greenpeace, WWF.
- Schaper, I. (2008).** Einfluss von Kompostanwendung und Unterflur-Bewässerung auf die Ertragsbildung von Spargel. Hannover: Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität

Hannover. Abgerufen am 9. November 2021 von <https://www.repo.uni-hannover.de/bitstream/handle/123456789/7181/591222353.pdf?sequence=1>

- Scharf, J., Grieb, M., & Fritz, M. (2021).** Agri-Photovoltaik. Straubing: Technologie- und Förderzentrum im Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Abgerufen am 28. Februar 2022 von <https://docplayer.org/205751627-Agri-photovoltaik-stand-und-offene-fragen.html>
- Scharf, J., Grieb, M., & Fritz, M. (2021a).** Agri-Photovoltaik - Stand und offene Fragen. TFZ - Technologie und Förderzentrum, Kompetenzzentrum für Nachwachsende Rohstoffe. Straubing: Eigenverlag.
- Schindele, S., Trommsdorff, M., Schlaak, A., Obergfell, T., Bopp, G., Reise, C., . . . Weber, E. (2020).** Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme. Freiburg: Applied Energy. Applied Energy, Vol. 265. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114737>
- Schlegel, J. (2021).** Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt. ZHAW, Forschungsgruppe Umweltplanung. Abgerufen am 28. Februar 2022 von https://digitalcollection.zhaw.ch/bitstream/11475/23607/3/2021_Schlegel_Literaturstudie-Freifl%C3%A4chen-PVA-und-Biodiversit%C3%A4t.pdf
- Schmid, A. (2010).** Strauchbeeren ökologisch angebaut (2. Ausg.). Mainz: Bioland Verlags-GmbH. Abgerufen am 16. Dezember 2021
- Schreiber, S. (2021).** Landwirtschaftszählung 2020, Struktur, Bodennutzung und Viehhaltung. Erfurt: Thüringer Landesamt für Statistik. Abgerufen am 18. Oktober 2021 von <https://statistik.thueringen.de/analysen/Aufsatz-08a-2021.pdf>
- Schulz, V., Weisenburger, S., & Butz, A. (2016).** Auswirkungen von Beschattung durch Agroforst auf landwirtschaftliche Kulturen. (S. 7). Augustenberg: Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg, Außenstelle Forchheim. Abgerufen am 8. November 2021 von https://www.researchgate.net/publication/330015714_Auswirkungen_von_Beschattung_durch_Agrofrost_auf_landwirtschaftliche_Kulturen?enrichId=rgreq-7e4d7803c84383298945167ea6556ea4-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMzMdAxNTcxNDtBUzo3MDk4OTM4MDM3NTMONzNAMTUONjl2M
- Schwertmann, U., Vogel, W., & Kainz, M. (1990).** Bodenerosion durch Wasser - Vorhersage des Abtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer Verlag Stuttgart.
- Scognamiglio, A. (2015).** 'Photovoltaic landscapes': Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision. ENEA - Italian National Agency for New Technologies, Energy and Sustainable Economic Development. Italien: Elsevier Ltd.
- Seidl, F. (2014).** Agroforstsysteme - Eine Chance für Bewirtschafter, Natur und Landschaft. LTZ Augustenberg. Abgerufen am 16. Februar 2022 von <https://docplayer.org/51481703-Auswirkungen-von-baumstreifen-auf-ertraege-und-bodenerosion.html>
- Semeraro, T., Aretano, R., Barca, A., Pomes, A., Del Giudice, C., Gatto, E., & Scognamiglio, A. (2020).** A Conceptual Framework to Design Green Infrastructure: Ecosystem Services as an Opportunity for Creating Shared Value in Ground Photovoltaic Systems.

- Semeraro, T., Pomes, A., Del Giudice, C., Negro, D., & Aretano, R. (2018).** Planning ground based utility scale solar energy as green infrastructure to enhance ecosystem services. *Energy Policy* 117, 218–227.
- Solar Direktinvest GmbH. (2021).** SolarDirektinvest. Abgerufen am 23. 02 2022 von Photovoltaik investieren - Vergütung nach 20 Jahren: <https://solar-direktinvest.de/photovoltaik/photovoltaik-investieren/verguetung-nach-20-jahren/>
- Solarserver (2021).** Agri-PV – solares Riesengewächshaus lässt Beeren wachsen. Abgerufen am: 03 Februar 2022 von: https://www.solarserver.de/2021/06/01/agri-pv-solares-riesengewachshaus-laesst-beeren-wachsen/?utm_source=newsletter&utm_campaign=newsletter
- Sommer, B., & Welzer, H. (2014).** Transformationsdesigns - Wege in eine zukunftsfähige Moderne. oekom.
- SonneSammeln. (2022).** SonneSammeln. Abgerufen am 28. Februar 2022 von <https://sonne-sammeln.de/category/biodiversitaet/>
- Spinnanker GmbH. (2021).** Spinnanker - innovative betonlose Fundamenttechnik. Wien, Österreich.
- Stadtplanungsamt Frankfurt am Main. (o.J.).** Planverfahren - das Bebauungsplanverfahren. Abgerufen am 28. 12 2021 von https://www.stadtplanungsamt-frankfurt.de/impresum_4237.html?psid=v7ben0skhpqqjsqn6jsq6qmds7
- Stahmer, J. (2018).** Ökologische Risikoanalyse zum Einsatz von Kulturschutzeinrichtungen in Obstkulturen. Dissertation. Univ. Koblenz-Landau. Abgerufen am 28. Februar 2022 von http://www.natura2000.rlp.de/pdf/downloads/%C3%96kologische_Risikoanalyse_des_Einsatzes_von_Kulturschutzeinrichtungen_in_Obstkulturen_auf_die_lokale%20Vogel-Bio%C3%B6nose.pdf
- Statistisches Bundesamt. (2021).** Land- und Forstwirtschaft, Fischerei - Strauchbeerenanbau und -ernte. Abgerufen am 09. 05 2021 von (Destatis): https://www.destatis.de/DE/Themen/Branchen-Unternehmen/Landwirtschaft-Forstwirtschaft-Fischerei/Obst-Gemuese-Gartenbau/Publikationen/Downloads-Obst/strauchbeerenanbau-2030319207004.pdf?__blob=publicationFile.
- Steinbauer, L. (2021).** Richtige Planung einer Neuanlage bringt Erfolg im Birnenanbau. Steiermark: Haidegger Perspektiven. Abgerufen am 12. Dezember 2021 von https://www.agrar.steiermark.at/cms/dokumente/11302381_13888112/5ca5b623/2012-01%20Richtige%20Planung%20einer%20Neuanlage%20bringt%20Erfolg%20im%20Birnenanbau.pdf
- Sunman Energy. (o.J.).** Lightweight Solar Pioneer. Abgerufen am 29. 12 2021 von <https://sunman-energy.com>
- SunPower GmbH. (02 2022).** SunPower from Maxeon Solar Technology. Abgerufen am 02. 02 2022 von SunPower Maxeon-Modul 40 Jahre Garantie: <https://sunpower.maxeon.com/de/solarmodul-produkte/garantie>
- Száz, D., Mihályi, D., Farkas, A., Egri, A., Barta, A., Kriska, G., & Horváth, G. (2016).** Polarized light pollution of matte solar panels: Anti-reflective photovoltaics reduce polarized light pollution but benefit only some aquatic insects. *Journal of Insect Conservation* 20(4), 663–675.

- Taiz, L., & Zeiger, E. (2000).** Physiologie der Pflanzen. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag GmbH.
- Tang, Y., Ma, X., Li, M., & Wang, Y. (2020).** The effect of temperature and light on strawberry production in a solar greenhouse. *Solar Energy*, Vol. 195. doi:<https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.11.070>.
- Taylor, R., Conway, J., Gabb, O., & Gillespie, J. (2019).** Potential ecological impacts of groundmounted photovoltaic solar panels. *BSG ecology*.
- TBV. (2021).** Thüringer Bauernverband. (Andre Rathgeber) Abgerufen am 21. 02 2022 von Klima- und Artenschutz: <https://www.tbv-erfurt.de/themen/klima-artenschutz>
- Thomann, M., & Lang, M. (2008).** Was kostet die Erstellung von Apfelneuanlagen. *Obstbau, Weinbau*(6). Abgerufen am 12. Dezember 2021 von <https://www.obstbauweinbau.info/obstbauweinbau/archiv.php?s,1636/>
- TLS. (2020).** Ernte im Marktobstanbau in Thüringen 2020. Erfurt: Thüringer Landesamt für Statistik. Abgerufen am 28. September 2021 von https://statistik.thueringen.de/webshop/pdf/2020/03207_2020_00.pdf
- TLS. (2021a).** Anbau und Ernte von Gemüse und Erdbeeren in Thüringen 2020. Erfurt: Thüringer Landesamt für Statistik. Abgerufen am 25. November 2021 von https://statistik.thueringen.de/webshop/pdf/2020/03113_2020_00.pdf
- TLS. (2021b).** Bodennutzung in Thüringen. Erfurt: Thüringer Landesamt für Statistik. Abgerufen am 16. November 2021 von https://statistik.thueringen.de/webshop/pdf/2020/03103_2020_00.pdf
- TLS. (2021c).** Strauchbeerenanbau in Thüringen rückläufig. Erfurt: Thüringer Landesamt für Statistik. Abgerufen am 28. September 2021 von https://statistik.thueringen.de/presse/2021/pr_027_21.pdf
- TLU. (2008).** Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie. Abgerufen am 06. 08 2019 von Landnutzung 2008: www.tlug-jena.de/uw_raum/umweltregional/thueringen/maps/landnutzung08.jpg
- TMIL. (2021a).** Ernte in Thüringen 2020 Witterung, Erträge und Preise. Erfurt: TMIL. Abgerufen am 11. November 2021 von https://infrastruktur-landwirtschaft.thueringen.de/fileadmin/Landwirtschaft/00_Bilder_Landwirtschaft/Erntebericht_2020.pdf
- TMIL. (2021b).** Ernte in Thüringen 2021: Witterung, Erträge und Preise. Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft.
- TMIL. (2022a).** Erntebericht Thüringen 2021. Erfurt: Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft. Abgerufen am 28. Februar 2022 von https://tbv-erfurt.de/files/downloads/Aktuelles/Erntebericht_2021_Web.pdf
- TMIL. (2022b).** InVeKoS. (T. M. Landwirtschaft, Hrsg.) Abgerufen am 28. 02 2022 von Benachteiligte Gebiete: <https://thueringenviewer.thueringen.de/thviewer/invekos.html>
- TMLFUN. (2013).** IMPAKT. Integrierte Maßnahmen zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels im Freistaat Thüringen. Erfurt.
- Touil, S., Richa, A., Fizir, M., & Bingwa, B. (2021).** Shading effect of photovoltaic panels on horticulture crops production: a mini review. *Reviews Environmental Science Bio/Technology* (2021) 20. doi:<https://doi.org/10.1007/s11157-021-09572-2>

- Trapp, M. (2020).** Kirschendorf Ockstadt. Mainz-Kastel: Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen. Abgerufen am 12. Dezember 2021 von <https://llh.hessen.de/pflanze/obstbau/kirschendorf-ockstadt/>
- Trommsdorff, M. (2020).** Agri-Photovoltaik vereint Landwirtschaft und PV. Broschüre. Abgerufen am 03.02.2022 von https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/infomaterial/brochures/potovoltaik/Flyer_Agri-PV_de_web.pdf.
- Trommsdorff, M., Gruber, S., Keinath, T., Hopf, M., Hermann, C., Schönberger, F., . . . Schindele, S. (2020).** Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende - Ein Leitfaden für Deutschland. Fraunhofer Institut, Solare Energiesysteme, Freiburg.
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Bauerle, A., . . . 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*. Elsevier. 140. 110694. doi:10.1016/j.rser.2020.110694
- TubeSolar AG. (o.J.).** TubeSolar. Abgerufen am 31. 01 2022 von Agri-Photovoltaik neu definiert: <https://tubesolar.de>
- Turney, D., & Fthenakis, V. (2011).** Environmental impacts from the installation and operation of large-scale power plants. *Renew Sust Energy Rev* 15 (6). doi:10.1016/j.rser.2011.04.023
- UBA. (2022).** Umweltbundesamt. Abgerufen am 22. 02 2022 von Flächenverbrauch für Rohstoffabbau: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/flaechenverbrauch-fuer-rohstoffabbau#inlandische-rohstoffentnahme>
- UBA, Lauf, T., Memmler, M., & Schneider, S. (2021).** Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger 2020. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.
- UMass. (o.J.).** *University of Massachusetts Amherst*. Abgerufen am 28. 11 2021 von Center for Agriculture, Food, and the Environment: <https://ag.umass.edu/crop-animal-research-education-farm>
- UM BWL. (2019).** Freiflächensolaranlagen Handlungsleitfaden. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart.
- Umweltschutzamt. (o. J.).** Stadtklima Stuttgart. Von Stadtklima Stuttgart: https://www.stadtklima-stuttgart.de/index.php?klima_klimaatlas_5_grund abgerufen
- Untersteller, F. (2018).** Rundschreiben an die kommunalen Planungsträger: Hinweise zum Ausbau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Baden-Württemberg Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Stuttgart.
- Van der Zee, F., Bloem, J., Galama, P., Gollenbeek, L., Van Os, J., Schotman, A., & Vries, S. (2019).** Zonneparken natuur en landbouw. Wageningen: Wageningen Environmental Research.
- Vanbergen, A., Garratt, M., Vanbergen, A., & Baude, M. B. (2013).** Threats to an ecosystem service: Pressures on pollinators. *Front. Ecol. Environ.* 11, 251–259.
- Vandest, E., & Hemetsberger, W. (2021).** Agrisolar Best Practices Guidelines. SolarPower Europe.
- VEE Sachsen e.V. (05. 01 2022).** VEE Sachsen e.V. - Vereinigung zur Förderung der Nutzung Erneuerbarer Energien. Abgerufen am 17. 02 2022 von Innovationen aus

Sachsen: Eine sächsische Blaupause für doppelte Acker-Energie: <https://www.vee-sachsen.de/artikel/innovationen-aus-sachsen-eine-saechsische-blaupause-fuer-doppelte-acker-energie>

- Wölfel, S., Degner, J., Günther, K., Götz, R. P., Zorn, W., Paul, R., & Farack, M. (2010).** Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Kartoffeln. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Abgerufen am 28. Oktober 2021 von <http://docplayer.org/23966084-Leitlinie-kartoffeln-thueringer-landesanstalt-fuer-landwirtschaft-zur-effizienten-und-umweltvertraeglichen-erzeugung-von.html>
- Wagegg, J., & Trumpp, S. (2015).** Freiflächen-Solaranlagen und Naturschutz – Eingriff oder Verbesserung im Vergleich zur Landwirtschaft. *Natur und Recht*. Springer.
- Walston, L. J., Li, Y., Hartman, H. M., Macknick, J., Hanson, A., Nootenboom, C., . . . Hellman, J. (2021).** Modeling the ecosystem services og native vegetation management practices at solar energy facilities in the Midwestern United States. *Ecosystem Services* Vol. 47. doi:<https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101227>
- Walston, L., Mishra, S., Hartmann, H., Hlohowskyj, I., McCall, J., & Macknick, J. (2018).** Examining the Potential for Agricultural Benefits from Pollinator Habitat at Solar Facilities in the United States. *Environ. Sci. Technol.* 52 (13), 7566–7576.
- Weidemann, T. (2020).** Mit Wasser, Malz und bestem Hopfen zum edlen Tropfen. Jena: Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und ländlichen Raum. Abgerufen am 16. November 2021 von http://www.tll.de/www/daten/publikationen/pm/2020/14_hopfen.pdf
- Weisskopf. (2022).** Agri-Photovoltaik – eine Erweiterung landwirtschaftlicher Wertschöpfung als Beitrag zur Stärkung des Artenschutzes und des ländlichen Raums sowie als Element einer kommunalen Energiewende im Dienst des Klimaschutzes. Rechtsanwältin Partnerschaft mbB.
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2021b).** Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agron. Sustain. Dev.* 41, 59.
- Weselek, A., Bauerle, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2021a).** Effects on crop development, yields and chemical composition of celeriac (*Apium graveolens* L. var. *rapaceum*) cultivated underneath an agrivoltaic system. *Agronomy* 2021, 11 733. doi:<https://doi.org/10.3390/agronomy11040733>
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019).** Agrophotovoltaic systems: applications, challenges and opportunities. A review. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>: Springer Nature.
- Wesselak, V., Schabbach, T., Link, T., & Fischer, J. (2017).** Handbuch Regenerative Energietechnik. Nordhausen, Thüringen, Deutschland: Springer Verlag.
- WG-BW. (2013).** Gesetz zur Neuordnung des Wasserrechts in Baden-Württemberg. Stuttgart: Landtag von Baden-Württemberg .
- Willockx, B. (2020).** Agrivoltaic systems: why not prioritize crops that grow in the dark? A case study with white asparagus. Leuven: KU Leuven. Abgerufen am 16. Februar 2022 von https://limo.libis.be/primo-explore/fulldisplay?docid=LIRIAS3374333&context=L&vid=Lirias&search_scope=Lirias&tab=default_tab&lang=en_US&fromSitemap=1
- Willockx, B., Herteleer, B., & Cappelle, J. (2020a).** Techno-economic study of agrovoltaic systems focusing on orchard crops. 37th European Photovoltaic Solar Energy

Conference and Exhibiton. Lissabon.

doi:<http://dx.doi.org/10.4229/EUPVSEC20202020-6DO.14.2>

Wilockx, B., Herteleer, B., & Capelle, J. (2020b). Combining photovoltaic modules and food crops: first agrovoltaic prototype in Belgium. Granada: Renewable Energy and Power Duality Journal, Volume No. 18. doi:10.24084/repqj18.291

Wirth, H. (2022). Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme, Erneuerbare Energien, Freiburg.

Wolske, E., Chatham, L., Juvik, J., & Branham, B. (2021). Berry Quality and Anthocyanin Content of 'Consort' Black Currants Growth undeer Artificial Shade. Plants (10). doi:<https://doi.org/10.3390/plants10040766>.

WWF. (2021). WWF-Positionspapier zum Ausbau der Photovoltaik. Wien. Abgerufen am 28. Februar 2022 von https://www.wwf.at/wp-content/cms_documents/wwf-pv-position-1.pdf

Yara. (2021). Yara Knowledge grows. Abgerufen am 2. Dezember 2021 von <https://www.yara.de/pflanzenernaehrung/weizen/wachstum-entwicklung/>