





Ole Badelt, Raphael Niepelt, Julia Wiehe, Sarah Matthies, Timo Gewohn, Manuel Stratmann, Rolf Brendel, Christina von Haaren

Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE)



Titelbild: Tanja Wehr

Auftraggeber:

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz Archivstraße 2 30169 Hannover

Antragsnummern: ZW6-80150424/ZW6-80150425

Laufzeit: 10/2018 - 07/2020

Adressen der Autorinnen und Autoren:

Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH) Am Ohrberg 1, 31860 Emmerthal

Dr. Raphael Niepelt Manuel Stratmann Timo Gewohn Prof. Rolf Brendel

Leibniz Universität Hannover

Institut für Umweltplanung (IUP) Herrenhäuser Str. 2, 30419 Hannover

Ole Badelt Dr. Julia Wiehe Dr. Sarah Matthies Prof. Christina von Haaren

Institut für Festkörperphysik (FKP) Appelstraße 2, 30167 Hannover

Prof. Rolf Brendel

Inhaltsverzeichnis

1	Einle	eitung	1
	1.1	Hintergrund – PV-Freiflächenanlagen in Niedersachsen	4
	1.2	Vorgehen im Projekt INSIDE	7
2	Tech	nnischer Gestaltungsrahmen von PV-Freiflächenanlagen	8
	2.1	Stand der Technik bei PV-Freiflächenanlagen	8
	2.2	Wirtschaftlichkeit von PV-Freiflächenanlagen	13
	2.3	Technische Möglichkeiten zur verbesserten optischen Integration	16
	2.4	Mögliche Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf Pachtpreise von Agrarland in Niedersachsen	17
3	Kom	binierte Solar-Agrar-Nutzung in Niedersachsen	19
	3.1	Vermeidung von Flächenkonkurrenz	19
	3.2	Technologische Aspekte	19
	3.3	Pflanzenbauliche Aspekte	31
	3.4	Wirtschaftliche Aspekte	33
	3.5	Einschätzung des Potenzials für Niedersachsen	35
4		wirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf die Biodiversität und nenschliche Gesundheit	37
	4.1	Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf Arten und Lebensgemeinschaften	37
	4.1.	1 Baubedingte Auswirkungen	38
	4.1.	2 Anlagebedingte Auswirkungen	38
	4.1.	Betriebsbedingte Auswirkungen	42
	4.2	Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf Arten und Lebensgemeinschaften in Niedersachsen am Beispiel der Vögel	42
	4.2.	1 Brutvögel	44
	4.2.	2 Durchzügler und Wintergäste	51
	4.3	Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf Boden und Wasserhaushalt	54
	4.3.	1 Baubedingte Auswirkungen	54
	4.3.	2 Anlagebedingte Auswirkungen	55
	4.3.	Betriebsbedingte Auswirkungen	56
	4.4	Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf das Landschaftsbild	57
	4.4.	1 Baubedingte Auswirkungen	57
	4.4.	2 Anlagebedingte Auswirkungen	57
	4.4.	Betriebsbedingte Auswirkungen	58
5	Star PV-l	ndortdifferenzierte Bewertung der Mensch- und Naturverträglichkeit von Freiflächenanlagen in Niedersachsen	60
	5.1	Vorgehen bei der Raumwiderstandsanalyse	60
	5.2	Die Raumwiderstandsanalyse zur Ermittlung der Potenzialflächen	63
	5.2.	Flächenkategorien zur Berücksichtigung des menschlichen Wohlergehens und von Infrastrukturen	65
	5.2.	2 Flächenkategorien zur Berücksichtigung der Biodiversität	67
	5.2.	3 Flächenkategorien zur Berücksichtigung des Boden- und Wasserhaushalts	70
	5.2.	Flächenkategorien zur Berücksichtigung technischer Restriktionen	71

	5.	2.5	Zuordnung der Flächenkategorien zu den RWS-Klassen	72
	5.3		mensch- und naturverträgliche Stromertragspotenzial aus ovoltaik-Freiflächenanlagen in Niedersachsen	76
	5.	3.1	Flächenbilanz und räumliche Verteilung	76
	5.	3.2	Stromertragspotenzial im geringen Raumwiderstand	80
	_	3.3 ngepass	Zusätzlich erschließbare Standorte durch Agrophotovoltaik und andere technisch ste Varianten	81
6	W	eitere F	Flächenpotenziale für PV in Niedersachsen	83
	6.1	Dac	nflächen-PV	83
	6.2	Sch	vimmende PV-Kraftwerke	85
	6.3	PV a	auf Abraumhalden der niedersächsischen Salzindustrie	86
	6.4	PV a	an und in Kombination mit Verkehrsinfrastruktur	86
7	Vi	isualisie	rung von PV-Freiflächenanlagen in vier niedersächsischen Landschaften	89
	7.1	Meth	nodik der Visualisierung	89
	7.2	Rep	räsentative Landschaften in Niedersachsen	92
	7.3	Ums	etzung der Visualisierungen	98
8	St	teuerun	gspotenziale für den Ausbau der PV-Freiflächenanlagen auf regionaler Ebene	. 100
	8.1		l in der regionalen Zusammenarbeit zwischen Region und Kommunen den Ausbau von Freiflächen-Photovoltaik eingegangen?	. 101
	8.2		es Konflikte bei der Planung und Umsetzung von PV-FFA, die den Ausbau hemmei	
	8.3	Wie	werden formelle und informelle Planungsinstrumente eingesetzt?	. 103
	8.4	Wel	che Synergien entstehen durch die technische Anpassung von Solarparks?	. 106
9	D	as Proje	ekt INSIDE im Kontext der niedersächsischen Energiewende	. 108
	9.1	Gen	erelle Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt	. 108
	9.	1.1	Flächenertrag / Effizienz der PV-FFA	. 108
	9.	1.2	Wirtschaftlichkeit	. 109
	9.	1.3	Auswirkungen von PV-FFA auf die Pachtpreise	. 109
	9.	1.4	Best-Practice-Beispiele für die Verknüpfung von PV-FFA und Naturschutz	. 110
	9.2	Emp	fehlungen an die verschiedenen Akteure des Ausbaus der PV-Freiflächenanlagen	. 111
	9.	2.1	Empfehlungen an das Land Niedersachsen	. 111
	9.	2.2	Empfehlungen an die kommunalen Stakeholder	. 114
	9.3	Ausl	olick und weiterer Forschungsbedarf	. 115
1(0	Literati	urverzeichnis	. 116
1	1	Gesetz	estexte und Verordnungen	. 128
Α	nhan	g		. 129

<u>Abbildungsverzeichnis</u>

Abb.	1:	Standorte der PV-Freiflächenanlagen in Niedersachsen, die im	
		Marktstammdatenregister der BNetzA angemeldet wurden (Stand 15.05.2020,	
		Bundesnetzagentur 2020)	6
Abb.	2:	Beispiele für verschieden ausgelegte PV-Anlagen in Deutschland: a) Standardanlage	
		ähnlich der Referenzanlage, Offingen (Bayern) (© Andreas Gücklhorn) b) Auf	
		maximalen Flächenertrag ausgelegte Anlage (© IBC Solar) c) Auf hohen Winterertrag	
		ausgelegte Testanlage am ISFH (© Raphael Niepelt)	8
Abb.	3:	Multi-Domänenansatz von DAIDALOS. Die möglichen Größenordnungen reichen vom	
		Bereich >10 m bis hin zum Mikrometerbereich (Schinke et al. 2018)	9
Abb.	4:	Verteilung der Einstrahlung in Raumwinkelintervalle der mit DAIDALOS verwendeten	
		Jahreslichtquelle (Schinke et al. 2018).	9
Abb.	5:	Beispiele für APV-Demonstrationsanlagen in Deutschland. a) APV-Anlagentyp 1,	
		"Heggelbach" (Foto: Hofgemeinschaft Heggelbach); b) APV-Anlagentyp 2,	
		"Weihenstephan" (Foto: Michael Beck); c) APV-Anlagentyp 3, "Dirmingen" (Foto:	
		Next2sun GmbH).	20
Abb.	6:	Freie Fläche a) kumulierte Photonenfluenz, b) Photonenstromdichte	23
Abb.	7:	Anlagentyp "Heggelbach": a) kumulierte Photonenfluenz, b) Photonenstromdichte	24
Abb.	8: <i>A</i>	Anlagentyp "Heggelbach" Photonenflussdichte von a) 1300 µmol/(m²s), b) 1600	
		μmol/(m²s)	24
Abb.	9: <i>A</i>	Anlagentyp "Heggelbach" Täglicher Verlauf der PV-Modulleistung	
		Anlagentyp "Weihenstephan" a) kumulierte Photonenfluenz, b) Photonenstromdichte	
		Anlagentyp "Weihenstephan" Photonenflussdichte von a) 1300 µmol/(m²s), b) 1600	
		μmol/(m²s)	27
Abb	12.	Anlagentyp "Weihenstephan" Täglicher Verlauf der PV-Modulleistung	
		Anlagentyp "Dirmingen" a) kumulierte Photonenfluenz, b) Photonenstromdichte	
		Anlagentyp "Dirmingen": Photonenflussdichte von a) 1300 µmol/(m²s), b) 1600	20
, ,,,,,,,		μmol/(m²s	29
Δhh	15.	Anlagentyp "Dirmingen": Täglicher Verlauf der PV-Modulleistung	
		Vorgehen zur Beurteilung der potenziellen Beeinträchtigung von Vogelarten des	00
ADD.	10.	Offenlandes in Niedersachsen und Bremen.	13
Δhh	17.	Zuordnung der niedersächsischen Offenlandarten (n=73) zu den untersuchten	40
AUU.	17.	Gruppen.	46
۸bb	10.	PV-FFA-sensible Arten: Großer Brachvogel (Numenius arquata), Uferschnepfe	40
ADD.	10.	- · · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	
		(Limosa limosa), Rotschenkel (Tringa totanus) und Kampfläufer (Philomachus	40
۸bb	10.	pugnax). Fotos: Salcher, J. und Nissen, C.	49
ADD.	19:	Beispiele für die Regenumverteilung bei verschiedenen Regenereignissen,	
A I. I.	00	Neigungswinkel und Betriebsstrategien der Sonnenkollektoren (Elamri et al. 2018b)	55
ADD.	20:	Schematische Darstellung des Abflussverhaltens (links) und der Evapotranspiration	
		(rechts) verändert nach Jahanfar et al. (2019).	56
Abb.	21:	Auswirkungen von Relief und Sichtverschattungen auf den Sichtraum (Schema), nach	
		(Herden et al. 2009)	
		Ermittlung des ökologischen Raumwiderstandes	
		Definition des Raumwiderstands gegenüber der Referenzanlage im Projekt INSIDE	62
Abb.	24:	Vorgehen im Projekt INSIDE bei der Ermittlung des mensch- und naturverträglichen	
		Stromertragspotenzials aus PV-FFA	63
Abb.	25:	Niedersachsens Landschaftstypen. Landschaftstypen mit dem höchsten Flächenanteil	
		sind ackergeprägte offene Kulturlandschaften (13.059 km²), grünlandgeprägte, offene	

		Kultunandschaften (11.091 km²) und genotz- bzw. waldreiche ackergeprägte	
		Kulturlandschaften (5.647 km²) (Gharadjedaghi et al. 2004; BfN 2005)	68
Abb.	26:	Änderung des Anteils der Grünlandfläche an der landwirtschaftlich genutzten Fläche	
		im Zeitraum 1999–2010, (Kreise, kreisfreie Städte) (UBA 2018)	69
Abb.	27:	Prozentualer Anteil der Raumwiderstandsklassen an der Gesamtfläche	
		Niedersachsens	76
Abb.	28:	Verteilung der Raumwiderstände (Referenzanlage) in Niedersachsen. Eine	
		vergrößerte Ansicht befindet sich in Anhang C.	78
Abb.	29:	Räumliche Verteilung des geringen Raumwiderstandes nach Landkreisen. Je dunkler	
		die Fläche, desto höher ist der Anteil an verfügbarer Fläche für PV-FFA (Einteilung in	
		Quintilen)	80
Abb.	30:	Leistungspotenzial der in Kap. 2 vorgestellten PV-FFA-Typen	81
Abb.	31:	Für PV-FFA zusätzlich geeignete Flächen durch technische Anpassungen und Einsatz	
		von APV in Niedersachsen	82
Abb.	32:	Solar-Carport am Flughafen Weeze (Foto: Airport Weeze).	88
Abb.	33:	Modellierung der PV-FFA im Projekt INSIDE (Einzelgrafiken Lenné3D GmbH 2020)	91
Abb.	34:	In Niedersachsen vorkommende Landschaftstypen (nach (BfN 2012e))	93
Abb.	35:	Landschaften mit den höchsten Flächenpotenzialen für PV-FFA in Niedersachsen	94
Abb.	36:	Beispielfläche zur Visualisierung von PV-FFA im Bersebrücker Land (Punkt und Pfeil	
		geben Standort und Blickrichtung des Fotografen an) (Lenné3D GmbH 2020)	95
Abb.	37:	Beispielfläche zur Visualisierung von PV-FFA in der Zevener Geest (Punkt und Pfeil	
		geben Standort und Blickrichtung des Fotografen an) (Lenné3D GmbH 2020)	96
Abb.	38:	Beispielfläche zur Visualisierung von PV-FFA im Innerstebergland (Punkt und Pfeil	
		geben Standort und Blickrichtung des Fotografen an) (Lenné3D GmbH 2020)	96
Abb.	39:	Beispielfläche zur Visualisierung von PV-FFA in den Ostfriesischen Seemarschen	
		(Punkt und Pfeil geben Standort und Blickrichtung des Fotografen an) (Lenné3D	
		GmbH 2020)	97
Abb.	40:	Visualisierung von PV-FFA in der Zevener Geest. Links: Referenzanlage ohne Zaun;	
		rechts: APV-Typ "Heggelbach" (Lenné3D GmbH 2020)	98
Abb.	41:	Visualisierung von PV-FFA im Bersenbrücker Land. Links: Variante	
		"winterertragsoptimiert"; rechts: APV-Typ "Heggelbach" (Lenné3D GmbH 2020)	98
Abb.	42:	Visualisierung von PV-FFA im Innerstebergland. Links: Referenzanlage blaue Module;	
		rechts: Referenzanlage grüne Module (Lenné3D GmbH 2020)	99
Abb.	43:	Visualisierung von PV-FFA in den Ostfriesischen Seemarschen. Oben links:	
		Referenzanlage; rechts: Variante "winterertragsoptimiert"; unten: APV-Typ	
		"Heggelbach" (Lenné3D GmbH 2020)	99

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Bruttostromerzeugung nach Energieträgern in Niedersachsen im Jahr 2017 (nach	
	(LSN 2019)	5
Tab. 2:	Variante 1 Referenzanlage	10
Tab. 3:	Variante 2 Flächenertragsoptimiert	11
Tab. 4:	Variante 3 Winterertragsoptimiert	12
Tab. 5:	Wirtschaftliche und technische Parameter	14
Tab. 6:	Zukünftige Stromgestehungskosten für Freiflächen-PV-Anlagen in Niedersachsen	16
Tab. 7:	Vergleich der Anlagentypen	22
Tab. 8:	In Niedersachsen gefährdete Brutvogelarten des genutzten Offenlandes und	
	landwirtschaftlicher Flächen, für die eine potenzielle Beeinträchtigung durch PV-FFA	
	näher untersucht wurde (nach Krüger und Nipkow 2015). Betrachtete Rote Liste-	
	Gefährdungskategorien: 1 = vom Aussterben bedroht; 2 = stark gefährdet; 3 =	
	gefährdet; R = extrem selten; V = Vorwarnliste	44
Tab. 9:	In Niedersachsen gefährdete Vogelarten des Offenlandes, die PV-FFA nachweislich	
	als Bruthabitat nutzen. Differenzierte Quellenangaben siehe Anhang	47
Tab. 10:	In Niedersachsen gefährdete Vogelarten des Offenlandes, die PV-FFA nachweislich	
	zur Nahrungssuche nutzen. Differenzierte Quellenangaben siehe Anhang	48
Tab. 11:	Einschätzung der potenziellen Nutzung einer PV-FFA als Nahrungs- und/oder	
	Bruthabitat durch die in Niedersachsen gefährdeten Vogelarten des Offenlandes	49
Tab. 12:	Geschützte nordische Gastvögel in Niedersachsen nach Anhang 1 oder Art. 4 Abs. 2	
	der EU-Vogelschutzrichtlinie	
	Flächenkategorien und Datensätze für die Einteilung der Raumwiderstände	
Tab. 14:	Bodenfruchtbarkeitsstufen nach Bug et al. (2019)	71
Tab. 15:	Übersicht über die Zuordnung der Flächenkategorien zu den RWS-Klassen	
	entsprechend ihrer Empfindlichkeit gegenüber der Referenzanlage	75
Tab. 16:	Leistungsdichte der verschiedenen Anlagenvarianten zur Berechnung des	
	Stromertragspotenzials	76
Tab. 17:	Verteilung der Raumwiderstände (Referenzanlage) in den Landkreisen in Hektar. Die	
	letzte Spalte zeigt den Anteil des geringen Raumwiderstandes an der Kreisfläche	
	Die Variationen der Visualisierung im Projekt INSIDE	
Tab. 19:	Landschaftstypen und Landschaften in Niedersachsen (nach (BfN 2014b))	92

Abkürzungsverzeichnis

AoK – Ackergeprägte, offene Kulturlandschaft

APV – Agrarphotovoltaik

Basis-DLM - Digitales Landschaftsmodell

BIPV - Bauwerkintegrierte Photovoltaik

BOS – "Balance of System", Begriff zur Zusammenfassung aller übrigen Systemkosten einer PV-Anlage, die nicht die PV-Technik-Komponenten Solarmodule und Wechselrichter betreffen

DAIDALOS - Software zur optischen Simulation von PV-Anlagen

DOM1 – Digitales Oberflächenmodell (Gitterweite 1 m)

EE – Erneuerbare Energien

EEG - Erneuerbare-Energien-Gesetz

GIS - Geoinformationssystem

GoK - Grünlandgeprägte, offene Kulturlandschaft

GW - Gigawatt, Einheit für die installierte Leistung von Kraftwerken, 1 GW = 109 W

GwK - Gehölz- bzw. waldreiche ackergeprägte Kulturlandschaft

KuLa - Kulturlandschaft

LCOE – Stromgestehungskosten (aus engl. levelized cost of electricity)

LK - Landkreis

LROP - Landesraumordnungsprogramm

noGa-Acker - Billigkeitsrichtlinie Nordische Gastvögel - Acker

PAR – Photosynthetisch aktive Strahlung (aus engl. photosynthetic active radiation)

PERC – Passivated Emitter and Rear Contact, marktbeherrschendes Zellkonzept für Si-Solarzellen

PFD – Photonenflussdichte (aus engl. photon flux densisty)

PV - Photovoltaik

PV-FFA - Photovoltaik-Freiflächenanlagen

PVLIB – Softwarepaket zur Simulation von PV-Erträgen

RWS - Raumwiderstand

RWS-Klasse - Raumwiderstandsklasse

TWh – Terawattstunden, Einheit für die Energiemenge, 1 TWh = 10¹² Wh

Zusammenfassung

Entsprechend dem "Leitbild einer nachhaltigen Energie- und Klimaschutzpolitik für Niedersachsen" ist es ein Ziel der Landesregierung, die gesamte Energieversorgung in Niedersachsen bis spätestens zum Jahr 2050 nahezu vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen. Der Klimaschutz soll umwelt- und sozialverträglich ausgestaltet werden, ohne die internationale Wettbewerbsfähigkeit der niedersächsischen Wirtschaft zu gefährden. Die Ausbauziele für Strom aus erneuerbaren Energien können mensch- und naturverträglich realistisch nicht allein über Windenergie erreicht werden. Das bedeutet insbesondere einen starken Ausbau der Solarenergie, die neben der Windkraft die einzige nachhaltige Energiequelle ist, welche in einem systemrelevanten Umfang zur Verfügung steht.

Die Dach- und Gebäudeflächen in Niedersachsen reichen jedoch nicht aus, um den zukünftigen Bedarf an Solarenergie zu decken. Daher müssen auch Teile der landwirtschaftlichen Flächen genutzt werden. Das Projekt INSIDE (Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft) setzt hier an, um erste Empfehlungen für die Praxis auf Grundlage des derzeitigen Wissensstandes abzuleiten und Forschungsbedarfe zu identifizieren. Während der 22-monatigen Bearbeitungszeit des Projektes wurde der Ausbau der PV-FFA in Niedersachsen aus den verschiedenen Blickwinkeln der beteiligten Disziplinen analysiert und modelliert. Dies erfolgte im engen Austausch mit verschiedenen niedersächsischen Stakeholdern im Rahmen von Beiratssitzungen, Befragungen oder wissenschaftlichen Fachtagungen.

Am Beispiel von drei Anlagenvarianten wird der Stand der Technik der PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) dargestellt. Die Anlagen erreichen dabei Leistungsdichten von 0,47 MW/ha im winterertragsoptimierten Modell, 1,01 MW/ha in der Referenzanlage bis hin zu 1,52 MW/ha in der flächenertragsoptimierten Ausgestaltung.

Die Ergebnisse zeigen, dass nach dem gegenwärtigen Stand der Technik gebaute PV-FFA einen deutlich höheren Flächenertrag haben als die meisten Solarparks des Bestands.

PV-FFA zählen aktuell (2020) weltweit zu den konkurrenzfähigsten Kraftwerken im Neubau. Auf absehbare Zeit ist mit weiter sinkenden Preisen für PV-Anlagen und auch für den damit erzeugten Strom zu rechnen. Unter der Annahme, dass bei der Vermarktung des Stroms ein Preis von 50 €/MWh (5 Ct/kWh) erzielt werden kann, liegen die mit PV-FFA erreichbaren Erträge pro Hektar und Jahr bei ~54.000 € für eine Anlage mit dem heutigen (2020) Stand der Technik, und bei ~72.000 € für eine flächenertragsoptimierte Anlage.

Aufgrund des Atomausstiegs und des Kohleausstiegs erscheint zukünftig ein Anstieg der Großhandelspreise für Strom realistisch. Somit ist davon auszugehen, dass sich in absehbarer Zeit größere PV-FFA auch in Niedersachsen ohne Förderung allein am Strommarkt refinanzieren können und nicht mehr an EEG-Regularien gebunden sind. Zur Realisierung brauchen sie zusammenhängende Flächen, um in der notwendigen Größe (Skaleneffekte) entstehen zu können.

Die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für PV-FFA wird als vergleichsweise sehr wettbewerbsfähige Alternative zur ackerbaulichen Nutzung verstanden, die das Pachtpreisniveau lokal steigen lassen kann. Analog zum Anbau von Energiepflanzen für die Biogasproduktion wird davon ausgegangen, dass die Flächen für die Standzeit der PV-Installation teilweise oder vollständig einer ackerbaulichen Nutzung entzogen werden. Ebenso wie bei Biogasanlagen wären Landkreise mit einer hohen Großviehdichte wesentlich stärker von Flächenkonkurrenzen und damit Pachtpreissteigerungen betroffen, wobei der Effekt pro produzierter Energiemenge bei Photovoltaik weniger stark ausgeprägt ist als bei der Bioenergie.

Agrophotovoltaik könnte den Landnutzungskonflikt zwischen Photovoltaik und Landwirtschaft lösen. Der breite Einsatz ist derzeit jedoch mit volkswirtschaftlichen Mehrkosten verbunden und erfordert finanzielle

Anreizprogramme. Es stehen verschiedene Technologievarianten zur Verfügung. Simulationen mit einem Strahlverfolgungsprogramm zeigen den zu erwartenden Stromertrag von drei verschiedenen Anlagentypen für die Agrophotovoltaik. Dabei wurden gemessene Sonneneinstrahlungsdaten der vergangenen 27 Jahre genutzt um die Erträge für den Standort Hameln Zusätzlich zeigen die Simulationen der Agrophotovoltaikanlagen Einstrahlungsverteilung auf dem Boden unter den PV Modulen. Je nach Anlagentyp ist der Boden zu einem Großteil verschattet und die Einstrahlungsverteilung sehr inhomogen, was die Auswahl an geeigneten Pflanzenkulturen erheblich einschränkt.

Für die Überdachung von landwirtschaftlichen Kulturen scheinen vor allem Äpfel, Heidelbeeren und eventuell Spargel geeignet zu sein. Die klassischen Fruchtfolgen in Niedersachsen mit Weizen, Mais, Zuckerrüben oder Raps lassen hingegen unter Teilverschattung deutliche Ertragseinbußen erwarten. Aufgrund des fortschreitenden Klimawandels und der Wasserknappheit könnten sich Änderungen in der Fruchtfolge oder zusätzlicher Beschattungsbedarf ergeben und die Nutzungsmöglichkeiten von APV erweitert werden.

Senkrecht aufgestellte, zaunartige Anlagen können in einem auf die Bewirtschaftung angepassten Reihenabstand installiert werden. An windexponierten Standorten können die Anlagen einen gewissen Erosionsschutz bieten, zudem könnten sich am Fuße der PV-Module Säume entwickeln. Die Anlagen können zudem auf Grünland eingesetzt werden.

Die Auswirkungen von PV-FFA auf Mensch und Umwelt können sowohl negativ als auch positiv sein und hängen in ihrer Intensität von Lage und Vornutzung der in Anspruch genommenen Flächen ab. PV-FFA können bei entsprechendem Management gezielt mit dem Schutz der Biodiversität verknüpft werden. Gerade in ausgeräumten Landschaften bieten sie Rückzugsräume für Tier- und Pflanzenarten, die auf landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen keinen Lebensraum mehr finden oder können als Trittsteinbiotope entlang von Verkehrswegen fungieren.

Mittels flächenbasierter GIS-Analysen wurden diejenigen Bereiche in Niedersachsen identifiziert, die für eine Nutzung durch PV-FFA geeignet sind (geringer Wert der Schutzgüter und geringe Empfindlichkeit gegenüber bau-, betriebs- und anlagenbedingten Wirkungen der Erzeugungsanlagen).

Rund 12 % (rund 560.000 ha) der Landesfläche haben demnach einen geringen Raumwiderstand (RWS) gegen PV-FFA und könnten genutzt werden. Diese Flächen sind heterogen über das Bundesland verteilt und vor allem im südwestlichen Landesteil sind große Bereiche für PV-FFA geeignet. Durch standortgerechte Anpassungen an der Ausgestaltung des Solarparks kann das Flächenpotenzial noch erweitert werden.

Nach aktuellem Stand der Technik (Referenzanlage INSIDE) können PV-FFA mit 1,01 MW auf einem Hektar installiert werden. Daraus ergibt sich ein möglicher jährlicher Energieertrag in Niedersachsen von 614 TWh.

Die Analyse des Akteursnetzes zeigt die besondere Relevanz der Behörden des Landes Niedersachsen, insbesondere des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Bauen und Klima-schutz (MU) und des Niedersächsischen Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucher-schutz (ML), als übergeordnete Entscheidungsebene. Die Umsetzung der Solar-Projekte vor Ort kann aber nur mit Unterstützung der regionalen/kommunalen Planungsträger erfolgen. Diese wiederum handeln in Kooperation mit den Betreibern und Projektierern aus der privaten Wirtschaft. Eine wichtige Voraussetzung für einen erfolgreichen Ausbau der PV-Nutzung ist die klare Kommunikation von Verantwortlichkeiten und Entwicklungszielen der einzelnen Ebenen.

Die Ergebnisse und auch die Diskussionen der Stakeholder im Beirat zeigen deutlich die große Flächenkonkurrenz zwischen Naturschutz, Energieerzeugung und Landwirtschaft. INSIDE zeigt aber auch die große technologische Bandbreite und Anpassungsfähigkeit der PV, die viele neue

Zusammenfassung

Nutzungsmöglichkeiten eröffnet. Ein besonderes Augenmerk könnte daher auf der Kombination von PV-Anlagen mit z. B. Landwirtschaft, aber auch mit Natur- oder Habitatschutz liegen.

Insbesondere die Landesplanung sollte es daher ermöglichen, einen Zubau von kleinen PV-FFA zu erreichen. Hierfür muss die EEG-Flächenkulisse für die PV in Gebieten mit geringem RWS nutzbar gemacht werden. Derzeit sind dies 110 m breite Randstreifen an Verkehrswegen und landwirtschaftliche Flächen in benachteiligten Gebieten. Konversionsflächen sind in der Praxis nur in Ausnahmefällen verfügbar. Auf den 110 m Randstreifen werden PV-FFA in Niedersachsen im Wesentlichen durch den in den regionalen Raumordnungsprogrammen festgelegten Vorbehalt Landwirtschaft verhindert. Dieser schließt die Installation von PV-FFA aktuell aus. Neben einer entsprechenden Anpassung im Landesraumordnungsprogramm sollte das Land entsprechend dem aktuellen EEG eine Verordnung erlassen um Acker- und Grünland in benachteiligten Gebieten nutzbar zu machen.

Die Regionalplanung soll insgesamt ermutigt werden, geeignete Flächen in hinreichendem Umfang als Vorrang- oder Vorbehaltsgebiet zur Nutzung solarer Strahlungsenergie auszuweisen. Dabei können die im GIS-Modell ermittelten Flächen mit geringem RWS als mensch- und naturverträglich nutzbar angesehen werden. Bei der Gestaltung der konkreten PV-FFA sollten Mindeststandards für eine umweltschonende Ausgestaltung vorgeschrieben werden.

Die Erstellung eines landesweiten Flächenkatasters auf Grundlage des bestehenden GIS-Modells ermöglicht die Verschneidung der räumlichen Daten und ist eine wichtige Informationsgrundlage für die Regionalplanung.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund – PV-Freiflächenanlagen in Niedersachsen

Die Energiewende und der Ausbau der erneuerbaren Energien haben in Niedersachsen eine hohe Priorität als gesamtgesellschaftliche Aufgabe. Im Jahr 2016 hat die niedersächsische Landesregierung das "Leitbild einer nachhaltigen Energie- und Klimaschutzpolitik für Niedersachsen" beschlossen (STK Nds. 2016). Dieses bildet den Rahmen für eine nachhaltige Energie- und Klimapolitik, mit der die Landesregierung ihren Beitrag zur Umsetzung des Pariser Klimaabkommens leisten möchte. Der Klimaschutz soll umwelt- und sozialverträglich ausgestaltet werden, ohne die internationale Wettbewerbsfähigkeit der niedersächsischen Wirtschaft zu gefährden. Ziel ist es, die gesamte Energieversorgung in Niedersachsen bis spätestens zum Jahr 2050 "nahezu vollständig" auf erneuerbare Energien umzustellen (STK Nds. 2016).

Mit dem EEG 2017 soll bundesweit der Anteil des aus erneuerbaren Energien erzeugten Stroms am Bruttostromverbrauch schrittweise auf mindestens 80 % bis zum Jahr 2050 gesteigert werden. In Niedersachsen wurde die Zwischenzielmarke von 40 - 45 % für das Jahr 2025 bereits 2017 mit einem Anteil von 69,7 % deutlich übertroffen (LSN 2019).

Bis zu einer "nahezu vollständigen" Energieversorgung aus erneuerbaren Energien ist es allerdings noch ein langer Weg. Dies gilt insbesondere, wenn der gesamte Primärenergieverbrauch in die Betrachtung einbezogen wird. In 2017 betrug der Anteil der erneuerbaren Energien in Niedersachsen hieran rund 19 % (LSN 2019) und lag damit deutlich über dem bundesweiten Durchschnitt von 12,4 %. Der Anteil der Mineralöle und Mineralölprodukte am Primärenergieverbrauch nimmt hierzulande nach wie vor rund 25 % ein, der des Erdgases/Erdölgases rund 33 % (LSN 2019).

Der Primärenergiebedarf ist zur Abschätzung des zukünftigen Strombedarfs eine entscheidende Kenngröße. Aktuelle Studien zum Energiebedarf im Jahr 2050 prognostizieren aufgrund der Sektorkopplung einen deutlich höheren Strombedarf als derzeit (Kruse et al. 2018; DLR et al. 2012; Walter et al. 2018; Faulstich et al. 2016), der über einen Energiemix aus allen verfügbaren erneuerbaren Energien gedeckt werden muss. Die Ausbauziele für Strom aus erneuerbaren Energien können mensch- und naturverträglich realistisch nicht allein über Windenergie erreicht werden (Walter et al. 2018). Das bedeutet insbesondere einen starken Ausbau der Solarenergie, die neben der Windkraft die einzige nachhaltige Energiequelle ist, welche in Niedersachsen in einem systemrelevanten Umfang zur Verfügung steht.

Die Solarenergie hat die höchsten Akzeptanzwerte aller erneuerbaren Energietechniken (Hübner et al. 2019; Agora Energiewende 2019) und bietet zusammen mit Onshore-Wind in Zukunft die günstigsten Stromgestehungskosten (Elsner et al. 2015). Da die Dach- und Gebäudeflächen in Niedersachsen jedoch nicht ausreichen, um den prognostizierten Energiebedarf zu decken, müssen nach aktueller Studienlage auch Teile der landwirtschaftlichen Flächen zur solaren Energieerzeugung genutzt werden. In den für den Runden Tisch Energiewende erstellten "Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050" werden in Niedersachsen 4,6 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche als notwendig angenommen (Faulstich et al. 2016). Dazu wäre je nach Windausbaupfad ein Anstieg bei der Bruttostromerzeugung durch PV-Anlagen bis zum Jahr 2050 um etwa den Faktor 28 nötig (MU Nds. 2018).

Eine neue Landnutzung in diesem Umfang in die Landschaft zu integrieren bringt große Herausforderungen mit sich. Neben einem befürchteten Flächenverlust oder der Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion ist der Einfluss von großflächigen PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA) auf das Landschaftsbild und die Biodiversität Gegenstand einer oft emotional geführten Diskussion. Da für ein

zukünftiges nahezu treibhausgasfreies Energiesystem in Niedersachsen der weitere Ausbau der PV-FFA zwingend notwendig ist, kommt der Frage ihrer Integration in die niedersächsische Kulturlandschaft im Konsens mit Landwirtschaft und Bürgern eine substanzielle Bedeutung zu.

Bisher prägt insbesondere die Windenergie den niedersächsischen Strommix und ihr Anteil an der Stromerzeugung stieg auf 31 % in 2017 (vgl. Tab. 1). Der Anteil der Photovoltaik an der Bruttostromerzeugung betrug dagegen mit 2.782 Mio. kWh Strom nur rund 3 % (LSN 2019).

Tab. 1: Bruttostromerzeugung nach Energieträgern in Niedersachsen im Jahr 2017 (nach (LSN 2019)

Energieträger	MWh	% Bruttostromerzeugung (gerundet)
Kohlen	11.040.446	12,79
Gase	13.612.256	15,77
Kernenergie	21.008.584	24,33
Heizöl/Kraftstoff	241.176	0,28
Abfall	345.854	0,40
sonstige nicht erneuerbare	973.503	1,13
Wind	26.956.397	31,22
Biomasse	9.142.223	10,59
PV	2.782.318	3,22
Wasser	233.113	0,27
Gesamt Bruttostromerzeugung	86.335.870	

Bundesweit trägt Photovoltaik mit 7,7 % des Bruttostromverbrauchs zum Energiemix bei (BMWi 2019), mit wieder kontinuierlich steigendem Zubau seit 2016. Nach 1,5 GW im Jahr 2016 wurden im Jahr 2017 rund 1,7 GW neue PV-Anlagen installiert (ZSW und Bosch & Partner 2019). 2018 und 2019 stieg der jährliche Zubau weiter an und erreichte 2019 nach Medienberichten fast 4 GW (Enkhardt 2020b). Der Anlagenbestand zum Jahresende 2019 liegt damit bei 49,78 GW.

Auch im Bereich der Freiflächenanlagen erhöhte sich der Zubau, wobei die Steigerungsrate im Vergleich mit dem Dachanlagenzubau geringer ausfällt (ZSW und Bosch & Partner 2019). Bundesweit sind rund 25,5 % der installierten PV-Leistung in Freiflächenanlagen umgesetzt (AEE 2020), die rund 29.300 ha Fläche belegen (ZSW und Bosch & Partner 2019). In Niedersachsen liegt dieser Anteil lediglich bei 14,5 % (AEE 2020). Derzeit sind laut Marktstammdatenregister rund 258 Anlagen auf 2031 ha in Betrieb (vgl. Abb. 1). Da diese Datenbank derzeit im Aufbau ist, ist damit zu rechnen, dass in der Praxis geringfügig mehr Anlagen realisiert wurden (Bundesnetzagentur 2020).

Der geringe Ausbau der Freiflächen-Photovoltaik in Niedersachsen ist derzeit politisch gewollt und im Landesraumordnungsprogramm festgeschrieben. In der Begründung zur Änderung der Verordnung über das LROP 2012 Niedersachsen heißt es, dass für die Nutzung von Solarenergie "grundsätzlich keine Freiflächen, sondern bereits versiegelte oder vorbelastete Flächen" genutzt werden sollen. Der Schutz landwirtschaftlicher Flächen habe Vorrang vor der Errichtung von Photovoltaikanlagen, um Nutzungskonkurrenzen zu vermeiden. Da andere Nutzungen der Landwirtschaft bereits Flächen

entzögen, sollen keine weiteren Flächenbedarfe entstehen. Die auf regionaler Ebene festgelegten Vorbehaltsgebiete Landwirtschaft sind daher von PV-FFA frei zu halten. Es wird angenommen, dass außerhalb solcher Gebiete "ausreichend Raum" für die Planung und Realisierung von Photovoltaikanlagen bleibt (ML 2012).

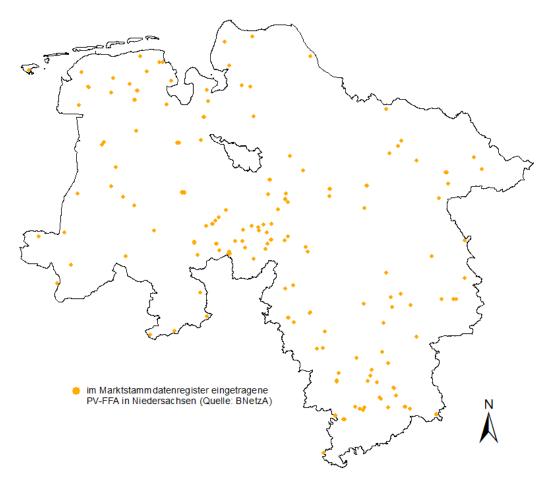


Abb. 1: Standorte der PV-Freiflächenanlagen in Niedersachsen, die im Marktstammdatenregister der BNetzA angemeldet wurden (Stand 15.05.2020, Bundesnetzagentur 2020).

Diese Festlegung wird damit begründet, dass die landwirtschaftliche Nutzung der Fläche auch nach einem Rückbau der Anlage dauerhaft erheblich eingeschränkt bleiben würde (ML 2012). Auch im zur Begründung gehörenden Umweltbericht wird angenommen, dass durch Freiflächenanlagen erhebliche Flächen in Anspruch genommen würden und die "technische Überprägung der Landschaft" zu - vermuteten - störenden Spiegelungen und Lichtreflexen führen würde. Die Festlegung im LROP führe "Vermeidung erheblicher belastender Umweltauswirkungen Photovoltaikanlagen im Freiraum und zu einer Belastungsbündelung, die als weitgehende Vermeidung von Umweltauswirkungen wirkt" (ML 2012). Positive Umweltwirkungen von PV-Anlagen werden nicht diskutiert. Stattdessen wird ausgeführt, die Festlegungen im LROP trügen zu "einer Minderung der CO2-Emissionen bei" (ebd.). Diese letzte Aussage verwundert besonders, da durch PV-Anlagen nachweisbar sowohl CO₂-Emissionen aus der landwirtschaftlichen Flächenbewirtschaftlung als auch im von fossilen Kraftwerken dominierten Stromsektor eingespart werden. Zudem ist die Flächeneffizienz des PV Stroms die erheblich günstiger als des derzeit auf 267.000 ha Ackerfläche stattfindenden Energiepflanzenanbaus, der der Nahrungsmittelproduktion ebenfalls Flächen entzieht (3N 2019).

Das Projekt INSIDE (Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft) setzt hier an, um erste Empfehlungen für die Praxis auf Grundlage des derzeitigen Wissensstandes abzuleiten und Forschungsbedarf zu identifizieren. Erste Pilotprojekte, bei denen PV-FFA in Kombination mit

Ackerbau bewirtschaftet werden ("Agrarphotovoltaik"), zeigen Handlungsspielräume, um die Flächenkonkurrenz zur landwirtschaftlichen Nutzung zu reduzieren. Technische Möglichkeiten zur ästhetischen Integration von PV-Modulen in die Landschaft und eine mögliche damit verbundene verbesserte Akzeptanz der Anlagen bei Anwohnenden sind bisher kaum erforscht. Gleiches gilt für die Untersuchung der Auswirkungen von PV-FFA auf die Biodiversität und Ökosystemleistungen.

1.2 Vorgehen im Projekt INSIDE

Im Verbundprojekt INSIDE wurden die Grundlagen für einen erfolgreichen konsensualen weiteren Ausbau der PV-Erzeugung insbesondere in Niedersachsen in sechs verschiedenen Arbeitspaketen untersucht. Das Projekt wurde interdisziplinär vom Institut für Solarenergieforschung GmbH Hameln/Emmerthal (ISFH) und der Leibniz Universität Hannover, Institut für Umweltplanung (IUP) sowie Institut für Festkörperphysik (FKP) bearbeitet.

Das Projekt war als Vorlaufforschungsprojekt konzipiert, in dem vor allem Methoden zur Potenzialermittlung demonstriert und Potenzialabschätzungen durchgeführt wurden. Im Ergebnis wurden Forschungsthemen identifiziert, die für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende in Niedersachsen besonders wichtig sind oder über die sich besonders große zusätzliche Chancen für die Integration von erneuerbaren Energien ergeben. Diese Erkenntnisse werden als Grundlage für weitere Forschungsanträge in dem Themenfeld genutzt.

Aufbauend auf einer umfassenden Recherche zu den technologischen Varianten der Freiflächen-Photovoltaik werden zunächst Anlagenvarianten für die weitere Modellierung im Projekt definiert (Kap. 2). Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Agro-Photovoltaik, die eine kombinierte Nutzung von Landwirtschaft und Stromproduktion ermöglichen soll (vgl. Kap. 3).

Mithilfe einer strukturierten Literaturrecherche zu den Auswirkungen der Freiflächenanlagen auf die Biodiversität und das menschliche Wohlergehen wird der aktuelle Stand des Wissens dargestellt (vgl. Kap. 4). Die Datenlage zu den Schutzgütern ist sehr unterschiedlich und lässt noch keine Rückschlüsse auf den Umfang und die Eintrittswahrscheinlichkeit dieser Auswirkungen in Niedersachsen zu. Letztere ist immer in Abhängigkeit von der Sensitivität des Standortes gegenüber einem Photovoltaik-Projekt zu sehen. Im GIS-Modell zur Ermittlung der mensch- und naturverträglich nutzbaren Flächenpotenziale wurden daher alle Flächenkategorien sogenannten Raumwiderstandsklassen zugeordnet (vgl. Kap. 5). Auf den Flächen mit geringem Raumwiderstand wurden anschließend die mensch- und naturverträglichen Stromertragspotenziale der verschiedenen Anlagenvarianten berechnet.

Das GIS-Modell zeigt, dass die technologischen Ausgestaltungsmöglichkeiten der PV-Technologie sehr vielfältig sind. Neben der landwirtschaftlichen Nutzfläche sind viele weitere Flächenkategorien als Standorte denkbar, so dass die potenziellen Erträge noch deutlich erweitert werden können (vgl. Kap. 6).

Neben diesen Analysen wurde durch das Projekt INSIDE ein enger Dialog mit und zwischen den Akteuren der Solarenergie in Niedersachsen initiiert. Hierzu gehörten Treffen des wissenschaftlichen Beirats aus Vertreterinnen und Vertretern der Ministerien und Verbände sowie erste Interviews mit der Regionalplanung in ausgewählten Regionen Niedersachsens (vgl. Kap. 7). Die Anregungen aus den Fachgesprächen wurden, ebenso wie ein extern vergebenes Rechtsgutachten genutzt, um Handlungsempfehlungen für eine bessere Integration der Solarenergie abzuleiten (vgl. Kap. 9.2).

2 Technischer Gestaltungsrahmen von PV-Freiflächenanlagen

2.1 Stand der Technik bei PV-Freiflächenanlagen

Um den Flächenbedarf für die Produktion einer vorgegebenen Menge an Solarstrom mit PV-FFA berechnen zu können, wurde auf Basis von heute üblichen Anlagen eine Referenzanlage definiert. Als Alternative zur Referenzanlage wurden noch zwei weitere Anlagentypen berechnet, die spezifische Vorteile gegenüber der Referenzanlage aufweisen, dafür aber in anderen Parametern weniger attraktiv sind (vgl. Abb. 2). Eine dieser Anlagen ist auf maximalen Flächenertrag optimiert, was bei begrenzter Fläche im Vergleich zum Strombedarf sinnvoll sein kann. Die andere ist auf einen möglichst hohen Winterertrag optimiert, was bei einem ganzjährig anliegenden Bedarf und begrenzter Versorgungsmöglichkeit aus alternativen Energiequellen vorteilhaft sein kann.







Abb. 2: Beispiele für verschieden ausgelegte PV-Anlagen in Deutschland: a) Standardanlage ähnlich der Referenzanlage, Offingen (Bayern) (© Andreas Gücklhorn) b) Auf maximalen Flächenertrag ausgelegte Anlage (© IBC Solar) c) Auf hohen Winterertrag ausgelegte Testanlage am ISFH (© Raphael Niepelt)

Ertragssimulation der Referenzanlagen

Für die Ertragsberechnung der gewählten Freiflächenreferenzanlagen und der APV-Anlagen aus Kapitel 3 wurde eine Kombination aus dem Ertragsprognose – Tool PVLIB der Sandia National Laboratories (F. Holmgren et al. 2018) und dem am ISFH entwickelten Strahlverfolgungsprogramm DAIDALOS (Holst et al. 2013) verwendet.

Bei der PVLIB handelt es sich um eine Toolbox für MATLAB, die diverse Funktionen und Werkzeuge für die Ertragsprognose von Photovoltaikmodulen enthält. Mit der PVLIB wurden die Leistungserträge einzelner PV-Module ermittelt. Die Erträge basieren dabei auf gemittelten Einstrahlungs- und Wetterdaten, die am ISFH in Emmerthal zwischen 1992 und 2018 gemessen wurden.

Das Strahlverfolgungsprogramm DAIDALOS ermöglicht eine sehr genaue Simulation der optischen Eigenschaften eines PV-Moduls. Dabei wird ein Multi-Domänen-Ansatz verfolgt, durch welchen der Weg von Photonen physikalisch korrekt durch Objekte in verschiedenen Größenordnungen simuliert werden kann. Die Simulationen umfassen dabei Größenordnungen im Mikrometerbereich bei der Textur der Solarzellen bis hin zum Meterbereich bei der Umgebung der PV-Module (Abb. 3).

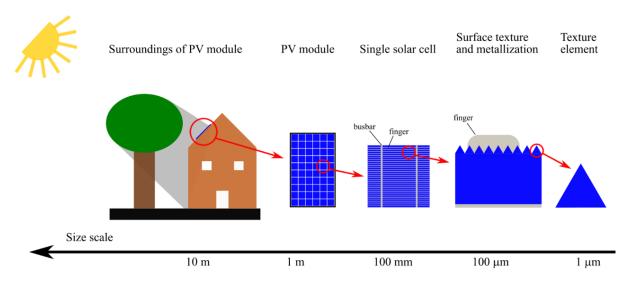


Abb. 3: Multi-Domänenansatz von DAIDALOS. Die möglichen Größenordnungen reichen vom Bereich >10 m bis hin zum Mikrometerbereich (Schinke et al. 2018)

Um eine realistische Darstellung des Tageslichts innerhalb einer Simulation zu ermöglichen, wird die Spektral- und Winkelverteilung modelliert (Ernst et al. 2016). Wir verwenden dabei eine Lichtquelle, die auf am ISFH durchgeführten Einstrahlungsmessungen aus 26 Jahren (1992 - 2018) basiert. Die Messungen wurden mit einem Pyranometerpaar durchgeführt, um Werte der horizontalen globalen und diffusen Bestrahlung mit einer zeitlichen Auflösung von fünf Minuten zu erhalten. Das Modell beinhaltet den Einfluss von Sonnenstand und Wolken auf die Winkel- und Spektralverteilung, die Streuung des Lichts wird jedoch wellenlängenunabhängig behandelt. Das bedeutet, dass der spektrale Einfluss von Aerosolen oder jahreszeitliche Veränderungen in der Atmosphärenzusammensetzung vernachlässigt werden. Das Ergebnis dieses Ansatzes ist eine mittlere jährliche Tageslichtverteilung, die die Himmelshalbkugel durch eine Unterteilung in Raumwinkelintervalle von 5° Azimut und 5° Höhe modelliert. Jedes dieser Intervalle enthält seine eigene spektrale Verteilung von diffusem und direktem Licht (Abb. 4).

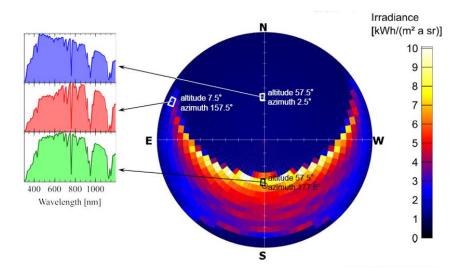


Abb. 4: Verteilung der Einstrahlung in Raumwinkelintervalle der mit DAIDALOS verwendeten Jahreslichtquelle (Schinke et al. 2018).

Während mit der PVLIB die Leistungserträge einzelner PV-Module berechnet wurden, wurden mit DAIDALOS die veränderten Einstrahlungsbedingungen zwischen einem einzelnen PV-Modul und einem PV-Park simuliert. Da DAIDALOS-Simulationen über mehrere Größenskalen möglich sind, konnten vor allem auch von der Parkgeometrie abhängige mögliche Abschattungen, Reflektionen und Rückseitenerträge sowie das auf den Boden unter den Modulen fallende und eventuell dort nutzbare Licht mit beachtet werden. Dabei wurden immer PV-Module in der Mitte eines PV-Parks betrachtet, Randeffekte wurden vernachlässigt.

Referenzanlage

Die Referenzanlage soll das derzeit (2020) wirtschaftlich optimale Design bei Freiflächenanlagen abbilden. Dieses hat sich in den letzten Jahren weiterentwickelt, da die verschiedenen preislichen Komponenten eines PV-Parks (Solarmodule, elektrische Anschlusstechnik, Installationskosten und sonstige Nebenkosten inklusive Erschließung und Pacht) sich stark unterschiedlich entwickelt haben. Insbesondere auf Seiten der Solarmodule konnten in den letzten Jahren erhebliche Preisreduktionen erzielt werden (VDMA Photovoltaic Equipment 2020). In PV-Parks werden diese Solarmodule stets so angeordnet, dass sie sich möglichst wenig gegenseitig verschatten, d.h. je flacher die Module über dem Boden angebracht sind, desto enger kann man die Modulreihen im Park anordnen. Gleichzeitig hat man die Module aber auch nach dem Sonnenstand auszurichten, um auch Sonne zu ernten.

In Zeiten, in denen der Solarmodulpreis auch die Kosten der Gesamtanlage dominiert hat, wurden die Solarmodule mit 35° Aufstellwinkel nach Süden ausgerichtet, damit pro kostbarer Modulfläche möglichst viel Sonne eingefangen werden konnte. In dieser Geometrie ergab sich ein vergleichsweise hoher Abstand zwischen zwei Modulreihen. Mit sinkenden Modulpreisen spielt aber der Solarertrag pro Modulfläche eine weniger starke Rolle bei den Gesamtkosten. Heute (2020) werden die Module daher flacher und die Modulreihen dichter beieinander aufgestellt. Typisch sind Werte von 18° Aufstellwinkel. Weil in dieser Anordnung mehr Solarmodule auf die gleiche Fläche passen, steigt der Ertrag pro Fläche stark an, auch wenn der Ertrag pro einzelnem Solarmodul leicht sinkt. Gleichzeitig sinken die Kosten für Verkabelung und die benötigte Bodenfläche pro Solarmodul. Die typischen Leistungsdichten pro Fläche von PV-Freiflächenanlagen steigen aufgrund dieser Entwicklung um einen Faktor 3 von etwa 300 kW/ha auf 1 MW/ha an. Die Parameter lauten wie folgt:

Tab. 2: Variante 1 Referenzanlage

Module	400W, 72 Zellen, 2024 mm * 1024 mm
Neigung	15°
Ausrichtung	180° (reine Südausrichtung)
Modulanordnung	4 Module mit kurzer Seite hintereinander
	auf Modultischen
Höhe des Modulfeldes	0,5 m unteres Ende, 1,56 m oberes Ende
Abstand der Modulreihen zueinander	7,5 m
Überbauung der Fläche mit Modulen	50,6 %
Leistungsdichte	1,01 MW/ha
Jährlicher Ertrag pro Modul	430 kWh
Maximaler Monatsertrag /	11.35
minimaler Monatsertrag	
Jährlicher Energieertrag	1,09 GWh/ha

Wie oben beschrieben, liegen installierte Leistung pro Fläche und Flächenertrag wesentlich höher als bei den meisten Solarparks des Bestands, aber auch als in anderen, auf Bestandsaufnahmen oder veralteten Annahmen der technischen Entwicklung beruhenden Studien. Da die Potenziale für PV-FFA in Studien in der Regel durch Flächenverfügbarkeit begründet sind, wird die Technologie in vielen Studien unterschätzt. Prominentes Beispiel ist die dena-Leitstudie (Kruse et al. 2018). Dort wurde für Freiflächenanlagen ein Flächenbedarf von 20 m²/kW angenommen, was in etwa dem doppelten Flächenbedarf der Referenzanlage entspricht. Des Weiteren geht die Studie von einem Flächenpotenzial in Deutschland von 3164 km² aus und kommt so auf ein Potenzial von 158 GW Freiflächen-PV. Verwendet man in dieser Rechnung die dem heutigen Stand der Technik entsprechende Referenzanlage, so ergibt sich ein Potenzial von 345 GW Freiflächen-PV auf derselben Fläche. Diese Zahlen machen deutlich, wie wichtig es ist, den Stand der PV-Anlagentechnik mit in die Potenzialberechnungen einzubeziehen. Eine weitere Schlussfolgerung könnte sein, dass für den zukünftigen Ausbau über Mechanismen nachgedacht würde, die eine besonders effiziente Flächennutzung fördern.

Anlagenvariante für maximalen Flächenertrag

Der maximal mögliche Flächenertrag lässt sich gegenüber der Referenzanlage noch weiter steigern, wenn die Solarmodule nicht in Südrichtung, sondern in Ost-West-Richtung und möglichst flach aufgeständert werden. Da in dieser Konfiguration die Verschattung minimal ist, können mehr Solarmodule auf derselben Fläche untergebracht werden.

Tab. 3: Variante 2 Flächenertragsoptimiert

Module	400W, 72 Zellen, 2024 mm * 1024 mm
Neigung	15°
Ausrichtung	90° und 270° (reine Ost- / Westausrichtung)
Modulanordnung	4 Module mit kurzer Seite hintereinander auf Modultischen, Form von Giebeldächern, am unteren Ende Weg für Revisionsarbeiten
Höhe des Modulfeldes	0,5 m unteres Ende, 1,56 m oberes Ende (kann in anderen Aufständerungsvarianten bis 4 m gehen)
Abstand der Modulreihen zueinander	8 m Moduldach, dann 2 m Revisionsweg
Überbauung der Fläche mit Modulen	75,9 %
Leistungsdichte	1,52 MW/ha
Jährlicher Ertrag pro Modul	382 kWh
Maximaler Monatsertrag /	15,01
minimaler Monatsertrag	
Jährlicher Energieertrag	1,45 GWh/ha

Die Anlage verwendet dieselben Solarmodule wie die Referenzanlage, es wird aber 39% mehr Leistung auf derselben Fläche installiert. Die Neigung von 15° stellt sicher, dass die Solarmodule bei Regen auf natürliche Weise von Staub und Schmutz gereinigt werden. Die Ertragssteigerung von 1,09 auf 1,45 GWh pro Hektar und Jahr (+33%) wird mit einer Ertragssenkung von 15% pro verbautem Solarmodul erkauft. Einsparpotenziale gegenüber der Referenzanlage ergeben sich durch etwas weniger Wechselrichterkapazität und Verkabelung (gering) sowie durch reduzierte Flächenkosten. In der Praxis werden flächenertragsoptimierte Anlagen ausgewählt, wenn Unternehmen möglichst viel PV-Strom für

den Eigenverbrauch auf dem eigenen Gelände produzieren wollen, die zur Verfügung stehenden Flächen aber begrenzt sind.

Anlagenvariante für maximalen Ertrag im Winter

In Systemen, in denen ein möglichst großer Anteil des Energiebedarfes durch Solarenergie geliefert werden soll (z.B. Sonnenhäuser oder auf PV basierende Inselsysteme), ist es wichtig, den Ertrag im Winter zu optimieren, da die saisonale Energiespeicherung nur mit hohem Aufwand realisiert werden kann. Hier wird nicht mehr ein möglichst hoher Jahresertrag pro Anlagengrundfläche angestrebt, sondern eine über das Jahr gesehen möglichst gleichmäßige Erzeugung. Dies wird durch eine Ausrichtung der Module (oder bei Solarthermieanlagen der Kollektoren) auf die in der dunklen Jahreshälfte flach stehende Sonne erreicht, was auf eine reine Südausrichtung mit steiler Neigung, in der Regel 45° - 70°, hinausläuft. Sollte ein hoher Anteil an Solarenergie im Energiemix Niedersachsens angestrebt werden, so wird dieser Aspekt mit Blick auf die Auslegung und Dimensionierung von anderen Systemkomponenten, die der saisonalen Speicherung dienen, relevant.

Ein über das Jahr gesehen relativ gleichmäßiger Verlauf der Erträge wird mit folgender Anlagenauslegung erreicht:

Tab. 4: Variante 3 Winterertragsoptimiert

Module	400W, 72 Zellen, 2024 mm * 1024 mm
Neigung	55°
Ausrichtung	180° (reine Südausrichtung)
Modulanordnung	4 Module mit kurzer Seite hintereinander auf Modultischen
Höhe des Modulfeldes	0,5 m unteres Ende, 3,86 m oberes Ende
Abstand der Modulreihen zueinander	16 m
Überbauung der Fläche mit Modulen	14,1 %
Leistungsdichte	0,47 MW/ha
Jährlicher Ertrag pro Modul	422 kWh
Maximaler Monatsertrag /	6,1
minimaler Monatsertrag	
Jährlicher Energieertrag	0,5 GWh/ha

Der im Jahresverlauf relativ gleichmäßige Ertrag wird mit einem im Vergleich zur Standardanlage leicht gesunkenen Ertrag pro Modul (- 2%) und einem deutlich geringeren Ertrag pro Landfläche (- 54%) erkauft. Allerdings wird in dieser Anlagenvariante auch ein deutlich geringerer Anteil der Fläche überbaut, was diesen Anlagentyp bei einer Doppelnutzung der Fläche attraktiv werden lässt, sofern das Verschattungsmuster mit der Ko-Nutzung (z. B. Naturschutz oder Viehhaltung) in Einklang steht (vgl. Kap. 4).

Werden bei diesem Anlagentyp bifaziale Module verwendet, so steigert sich der Ertrag um 15%. Allerdings fällt der zusätzliche Ertrag im Wesentlichen in der hellen Jahreshälfte an, so dass sich der Faktor Maximaler Monatsertrag / minimaler Monatsertrag auf 6,75 erhöht.

2.2 Wirtschaftlichkeit von PV-Freiflächenanlagen

Die Wirtschaftlichkeit und damit die Gestehungskosten des Stroms von PV - FFA hängen vor allem von der Höhe der Investition und dem nutzbaren Stromertrag, sowie, zu einem geringeren Teil, von den anlagenspezifischen Betriebskosten ab.

Gestehungskosten von PV-Freiflächenanlagen

Die spezifischen (also kapazitätsbezogenen) Investitionen betreffen die PV-Technik-Komponenten Solarmodule und Wechselrichter sowie die in der PV-Technik unter dem Begriff "Balance of System" (BOS) zusammengefassten übrigen Systemkosten für Aufständerung und weitere Aufwendungen wie Einzäunung, elektrische Anbindung, die Vorbereitung der Fläche sowie Mess- und Regeltechnik. Die spezifischen Investitionen hängen im Wesentlichen von der realisierten Anlagengröße und den damit verbundenen Skaleneffekten ab. Sie liegen im Bereich von 700.000 € / MW für kleine Anlagen mit 0,75 MW Leistung und 500.000 € / MW für sehr große Anlagen mit 200 MW Leistung (Altmann, S. 2020). Die untersuchten Anlagenvarianten unterscheiden sich bei gleicher Größe in den Investitionen lediglich um 2% (vgl. Tab. 5).

Der nutzbare Stromertrag hängt von der Einstrahlung und von der Anlagenvariante, sowie der Aufnahmefähigkeit der angeschlossenen Last ab. In Niedersachsen kann mit einer durchschnittlichen Einstrahlung von 1100 kWh/m² gerechnet werden, dennoch gibt es natürlich lokale Unterschiede. Ebenfalls berücksichtigt werden muss eine mögliche Degradation der Solarmodule über die Lebensdauer der Anlage. Aufgrund der im Vergleich zu anderen Erzeugungstechnologien geringen installierten PV-Leistung in Niedersachsen ist davon auszugehen, dass der PV-Strom nicht wesentlich zu einer Kapazitätsüberschreitung im Stromnetz beiträgt und deswegen auch nicht abgeregelt werden muss.

Die Betriebskosten bestehen aus mit der Investition skalierenden laufenden Kosten, z. B. für die Anlagenversicherung, sowie aus anlagenbezogenen Kosten für Betrieb und Instandhaltung, Pacht für das Gelände, Rückstellungen für Ersatzbeschaffungen, sowie die Kosten der Fernüberwachung. Typischerweise liegen die jährlichen Betriebskosten in der Summe bei etwa 2% der Investition.

Sind diese Parameter bekannt, berechnen sich die Stromgestehungskosten zu (Kost et al. 2018)

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

In die Berechnung fließen ein die Investition I_0 , die laufenden Kosten A_t im Jahr t, der Ertrag der Anlage $M_{t,el}$ im Jahr t sowie die Anzahl der Betriebsjahre n. Für die Berechnung von A_t und $M_{t,el}$ müssen Annahmen für Inflation, Kapitalkosten und Degradation der Solarmodule getroffen werden. Mit den in Tab. 5 angegebenen wirtschaftlichen und technischen Parametern ergeben sich für eine Anlage in Niedersachsen Stromgestehungskosten von $42,34 \in MWh$ oder 4,23 ct/kWh.

Voraussetzung dafür ist, dass die Anlagen eine ausreichend große zusammenhängende Fläche belegen können. Die durchschnittliche Zuschlagsgröße in der Ausschreibungsrunde der Bundesnetzagentur für Solar-Anlagen im September betrug 3,43 MW. Für die Berechnungen des niedersächsischen Freiflächenpotentials im Rahmen von INSIDE haben wir eine Mindestgröße der Anlage von 1 ha (≙1 MW installierte Leistung) angenommen.

Tab. 5: Wirtschaftliche und technische Parameter

Parameter	Wert	Quelle
Investition I ₀	500 €/kW	Altmann, S. (2020)
Betriebskosten im ersten Jahr A ₁	10 €/kW	Altmann, S. (2020)
Solarertrag im ersten Jahr M ₁	1050 kWh/kW	ISFH (2020)
Anlagenlebensdauer n	25 a	ZSW und Bosch & Partner (2019)
Degradation	0,25%/a	ISFH (2020)
Inflation	2%/a	Kost et al. (2018)
Kapitalkosten inkl. Inflation	4,1%/a	Kost et al. (2018)
Stromgestehungskosten LCOE	42,34 €/MWh	

Da viele Faktoren einfließen, die nichts mit dem Anlagendesign zu tun haben, ergibt sich für die Gestehungskosten aus verschiedenen Publikationen oft eine größere Bandbreite als für die spezifischen Investitionen. Aus diesem Grund bieten die spezifischen Investitionen für einen Vergleich verschiedener Literaturstellen oftmals eine sicherere Variante. Der hier berechnete LCOE-Wert gibt aber dennoch einen wertvollen Hinweis für die politische Diskussion zum Thema Freiflächen-PV, denn er belegt eindrucksvoll, dass große PV-Kraftwerke auch in Niedersachsen nicht mehr weit davon entfernt sind, auch ohne eine durch die EEG-Marktprämie garantierten Mindestpreis konkurrenzfähig zu sein. In Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern sind heute (2020) schon erste Großkraftwerke (> 100 ha) außerhalb der EEG-Richtlinien projektiert, die sich allein über den am Markt erzielbaren Strompreis finanzieren werden (Enkhardt 2019). Diese Projekte sind entsprechend nicht an die EEG-Regularien zu Standortvorgaben (z. B. für Konversionsflächen und landwirtschaftlich benachteiligte Gebiete) gebunden, dennoch brauchen sie zusammenhängende Flächen, um in der notwendigen Größe (Skaleneffekte) entstehen zu können. Daher existiert an dieser Stelle ein Bedarf an zusätzlichen Regelungen, um einen zunehmenden Ausbau von Freiflächen-PV zu ermöglichen und mit den Belangen anderer Landnutzungsarten, insbesondere der Landwirtschaft und des Naturschutzes, in Einklang zu bringen.

Zukünftige Entwicklung

Für zukünftige Gestehungskosten betrachten wir die zu erwartende Entwicklung bei den Investitionen und Betriebskosten. Die Kosten pro installierter Kapazität für PV-Systeme folgen seit Jahren einem Abwärtstrend, der sowohl durch Skaleneffekte als auch durch technische Innovationen angetrieben wird (VDMA Photovoltaic Equipment 2020; Kavlak et al. 2018; Jager-Waldau et al. 2018; Kelm et al. 2018). Zu den Systemkosten p_{System} tragen bei: der Einzelpreis des Solarmoduls p_{Modul} , der Preis des Wechselrichters $p_{Inverter}$ und die unter p_{BOS} zusammengefassten restlichen Kosten. Da diese drei Preisbestandteile einer unterschiedlichen Dynamik folgen (Trancik et al. 2015) sollen sie an dieser Stelle getrennt betrachtet werden:

$$p_{System} = p_{Modul} + p_{Inverter} + p_{BOS}$$

Um einen aussagekräftigen Systempreis zu erhalten, summieren wir dabei unter dem Terminus p_{BOS} bei dieser Auftragung analog zu (Trancik et al. 2015) alle für die Errichtung des Systems anfallenden Kosten bis auf Wechselrichter und Solarmodule, also auch externe Kosten für Zuwegung, Bodenbearbeitung, Einzäunung und Netzanschluss.

Die Preise für Solarmodule folgen einem Potenzgesetz und fallen seit Jahren mit der kumulierten Gesamtmenge der ausgelieferten Module. Die historische Lernrate, d.h. die Preisabnahme, die mit der Verdoppelung der Kapazität verbunden ist, kann zwischen 1976 bis 2018 mit 23,6% bestimmt werden. In den letzten Jahren sind die Preise jedoch schneller gesunken als durch die langjährige Statistik impliziert. Betrachtet man nur die Jahre seit 2006, liegt die Lernrate der Solarmodulpreise bei 40% (VDMA Photovoltaic Equipment 2020). Dieser Wert scheint für die Vorhersage zukünftiger Entwicklungen sinnvoller zu sein, da sie Effekte aus dem Frühstadium der Solarindustrie ignoriert. Als Bezugsjahr wählen wir das Jahr 2018, in dem ein Solarmodulpreis in Deutschland von 240 €/kW belegt ist (VDMA Photovoltaic Equipment 2020; Dressel Wuppertal).

Aufgrund von Materialkosten und thermodynamischen Wirkungsgradgrenzen ist es denkbar, dass sich die Modulpreise in Zukunft einer Untergrenze nähern werden. Daher gehen wir für die Preise in der Zukunft von einem begrenzten negativen Wachstum nach

$$p_{Modul}(P_{Installiert}) = Lb - (Lb - p_{Modul,2018}) * (1 - 0.4)^n$$

aus, wobei $P_{installiert}$ die kumulativ installierte PV-Leistung, Lb die Untergrenze des Modulpreises und n die Anzahl der Verdoppelungen der kumulativen Installationen seit dem Referenzjahr 2018 ist. Somit ist

$$n = \log_2 \frac{P_{Installiert}}{P_{Installiert,2018}}$$
.

Für die Untergrenze des Modulpreises gehen wir davon aus, dass wir den Modulwirkungsgrad verdoppeln (eher ambitioniert) und den Modulpreis halbieren können (sehr wahrscheinlich):

$$Lb = \frac{p_{Modul,2018}}{2} \cdot \left(\frac{\eta_{2018}}{2 \cdot \eta_{2018}}\right) = \frac{240}{4} \cdot \frac{\epsilon}{kW} = 60 \cdot \epsilon / kW.$$

Für die kumulierte installierte PV-Leistung gehen wir von einem Weltmarkt von 120 GW im Jahr 2019 und einem durchschnittlichen jährlichen Marktwachstum von 10% aus (VDMA Photovoltaic Equipment 2020; Jager-Waldau et al. 2018):

$$P_{Installiert}(t > 2018) = P_{Installiert,2018} + 120 GW \sum_{i=2019}^{n} 1,1^{(i-2019)}$$

Kombiniert man die vorangehenden Formeln, so erhält man eine Annahme für den zukünftigen Solarmodulpreis von 92 €/kWp im Jahr 2035 und 70 €/kWp im Jahr 2050.

Im Falle des Wechselrichters gehen wir davon aus, dass die Preislernrate auf dem historischen Wert von 18,9% verbleibt (Trancik et al. 2015). Somit,

$$p_{Wechselrichter}(P_{Installiert}) = p_{Wechselrichter,2018} \cdot (1 - 0.189)^n$$

Für die BOS gehen wir von jährlichen Preissenkungen von 0,75% aus (Trancik et al. 2015):

$$p_{BOS}(t > 2018) = p_{BOS,2018} \cdot (1 - 0.0075)^{(t-2018)}$$
.

Nach dem Erfahrungsbericht zum EEG (Kelm et al. 2018) lag der Preismedian für Freiflächen-PV-Anlagen in Deutschland im Jahr 2017 bei 700 €/kWp, davon 380 €/kWp für die Solarmodule. Unter Berücksichtigung des Preisrückgangs bei Solarmodulen von 380 €/kWp auf 240 €/kWp im Jahr 2018 (VDMA Photovoltaic Equipment 2020) und eines ebenfalls gemeldeten etwas moderateren Preisrückgangs bei Wechselrichtern erhalten wir für 2018

$$p_{System,2018} = p_{Module} + p_{Wechselrichter} + p_{BOS} = \frac{240 \, \in}{kW_p} + \frac{40 \, \in}{kW_p} + \frac{270 \, \in}{kW_p} = \frac{550 \, \in}{kW_p}.$$

Für 2019 ergeben sich Systemkosten von 520 €/kW, für 2020 von 495 €/kW. Diese Werte stimmen mit den Berichten aus dem INSIDE-Beirat für größere Anlagen an guten Standorten überein. Systemkosten von kleineren oder ungünstig zugeschnittenen PV-Parks können auch darüber liegen. Für Großprojekte außerhalb der EEG-Förderung ist jedoch der untere Bereich der Preisspanne bei PV-Parks maßgeblich. Für die Folgejahre ergeben sich die in Tab. 6 dargestellten Gestehungskosten. Die Gestehungskosten werden demnach noch einmal deutlich sinken, was die Aussage aus dem vorigen Abschnitt, wonach große PV-Kraftwerke auch in Niedersachsen demnächst außerhalb jeglicher Förderung lohnend sein werden, bestätigt.

Tab. 6: Zukünftige Stromgestehungskosten für Freiflächen-PV-Anlagen in Niedersachsen

Jahr	Stromgestehungskosten LCOE
2025	35,56 €/MWh
2030	31,99 €/MWh
2040	27,70 €/MWh
2050	24,97 €/MWh

2.3 Technische Möglichkeiten zur verbesserten optischen Integration

Farbige Gestaltung der Module

Neben den Kosten ist das Aussehen der Photovoltaikanlage ein wichtiger Parameter im Entscheidungsprozess für die Anwendung von Photovoltaik. Dies gilt auch im Bereich der bauwerkintegrierten Photovoltaik (BIPV), in dem bereits seit längerem zu den visuellen Auswirkungen der Module geforscht wird. Damit eine BIPV-Anlage von Architekten und Hauseigentümern in Erwägung gezogen wird, muss sich diese Anlage in das Gebäudebild einfügen. Da das beim standardmäßigen dunkelblauen oder schwarzen Aussehen von PV-Modulen oft nicht der Fall ist, wurden in den vergangenen Jahren viele Verfahren entwickelt, um das Aussehen von PV-Modulen farbig zu gestalten und die Solarzellen zu maskieren. Eine Änderung des Aussehens von Photovoltaikmodulen kann auch bei Freiflächenanlagen dazu führen, dass diese sich im Landschaftsbild besser einfügen und sich dadurch die Akzeptanz der Bevölkerung für Anlagen in ihrer direkten Umgebung erhöht.

Dabei hebt so eine Veränderung des Aussehens nicht nur den Preis pro PV-Modul an, sondern senkt auch den PV-Ertrag, da ein Teil der einfallenden Strahlung nicht absorbiert, sondern reflektiert wird. Dabei sind Farbeindruck, PV-Ertrag und der Preis unmittelbar voneinander abhängig. Die Möglichkeiten reichen von 7% Verlust im PV-Ertrag bei einem guten Farbeindruck mit einer Preiserhöhung um den Faktor 3 bis zu hohen Ertragsverlusten (bis zu 40%) bei einer Preiserhöhung von 15%-30% (Kutter et al. 2018).

Im Rahmen des INSIDE Projektes wurde eine am ISFH entwickelte Technik zum Verändern des Aussehens von PV-Modulen ausgewählt (Gewohn et al. 2018). Mit dieser Technik erhöht sich der Preis pro PV-Modul um bis zu 18%, der Ertragsverlust bei dem ausgewählten Grünton beträgt dabei 15%.

Park- und Umgebungsgestaltung

Für den optischen Eindruck einer PV-FFA ist neben der Größe, der Strukturierung und der Sichtbarkeit gerade die Einbindung in die typischen Dimensionen und Maßstäbe der umgebenen Landschaft wichtig. Aus technischer Sicht kann die optische Wirkung von PV-Parks vergleichsweise leicht durch ein die örtliche Topographie berücksichtigendes Parkdesign und verschiedene Möglichkeiten der

Randgestaltung auf ein erträgliches Maß reduziert werden (UM BaWü 2019). Einige Gestaltungsmöglichkeiten werden in den Kapiteln 4, 7 und 8 aufgegriffen.

2.4 Mögliche Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf Pachtpreise von Agrarland in Niedersachsen

Stehen für Flächen, die der Produktion von Futter- und Nahrungsmitteln dienen, wettbewerbsfähige Alternativnutzungen zur Verfügung, so kann von einem lokal und regional steigenden Pachtpreis ausgegangen werden, weil die Verpächter bei hohem Wettbewerb in der Regel höhere Pachtpreise durchsetzen können. PV-FFA sind aufgrund des vergleichsweise hohen erzielbaren Umsatzes pro Fläche eine solche wettbewerbsfähige Alternative zur ackerbaulichen Nutzung. Die möglichen Auswirkungen eines großskaligen PV-Ausbaus auf die Pachtpreise in Niedersachsen wurden von Sabine Hübner und Dr. Bernd Hardeweg vom Zentrum für Betriebswirtschaft im Gartenbau e.V. (ZBG) im Rahmen eines Unterauftrags untersucht (Hübner und Hardeweg 2020). Da es in Niedersachsen bisher zu wenige PV-FFA gibt, als dass diese eine messbare Veränderung der Pachtpreise bewirkt hätten, wurde ein Vergleich zu den in Niedersachsen stark verbreiteten Biogasanlagen gezogen, deren Einfluss auf die Pachtpreise vergleichsweise gut bekannt ist. Details zur verwendeten Methodik finden sich im Gutachten des ZBG (vgl. Anhang).

Das Szenario des ZBG orientiert sich am Energieszenario 2050 für den runden Tisch Energiewende in Niedersachsen, in dem zusätzliche PV-FFA auf 116.670 ha vorgeschlagen wurden, was knapp 2,5% der niedersächsischen Landesfläche entspricht (Faulstich et al. 2016). Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Flächen der Produktion von Futter- und Nahrungsmitteln vollständig entzogen werden, ähnlich dem Anbau von Energiepflanzen auf 267.000 ha in Niedersachsen (3N 2019). Zusätzlich wurde angenommen, dass die Flächeninanspruchnahme durch PV-FFA nicht gleichmäßig über das Land verteilt ist, sondern nur in zehn niedersächsischen Landkreisen stattfindet, die jeweils mehr als 2,5% naturverträgliche Eignungsfläche für PV-FFA aufweisen (vgl. Kap. 5). Basierend auf diesen Annahmen wurden PV-induzierte Pachtpreissteigerungen sowohl im Landkreis der Flächeninanspruchnahme (direkter Effekt) sowie in den umliegenden Landkreisen (indirekter Effekt) berechnet. Im Ergebnis wird ein Anstieg der Pachtpreise bei Neuverträgen zwischen 3,8% und 14,8% erwartet. Ebenso wie bei Biogasanlagen sind Landkreise mit einer hohen Großviehdichte wesentlich stärker von Pachtpreissteigerungen betroffen.

PV-FFA auf nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen wurden in der Rechnung ebenso wenig betrachtet wie eine teilweise Rückumwidmung der Fläche für Energiepflanzen zugunsten von Nahrungsmitteln oder eine Reduzierung der Großviehdichte. Diese Varianten würden die Auswirkungen des PV-Ausbaus auf die Pachtpreise noch mindern, oder bei konsequenter Anwendung auch ganz aufheben.

Im Vergleich zu Biogasanlagen sollte berücksichtigt werden, dass der energetische Flächenertrag von PV-Freiflächen den Stromertrag aus dem Energiepflanzenanbau um das 50-65-fache übersteigt: In Niedersachsen werden auf 267.000 ha Energiepflanzen für Biogas angebaut. Mit dieser Fläche können 83% der Bemessungsleistung der 892 MW in Niedersachsen installierten Biogasanlagenleistung abgedeckt werden (3N 2019). Für die Bestimmung der Bemessungsleistung wird eine Anlagenausnutzung von 8000 Stunden im Jahr angenommen. Mit diesen Werten lässt sich der Anbaufläche somit eine Stromproduktion von 892 MW * 0,83 * 8000 h = 5.922.880 MWh zuordnen. Damit ergibt sich ein flächengewichteter jährlicher Stromertrag von 5.922.880 MWh / 267.000 ha = 22,2 MWh/ha. Im Vergleich dazu liegt der Stromertrag der PV-Anlagenvarianten 1 und 2 wesentlich höher, und zwar um das 50-fache für Anlagentyp 1 (1.090 MWh/ha) und das 65-fache für Variante 2 (1.450 MWh/ha).

Im Energieszenario Niedersachsen 2050, aus dem die hier untersuchten Flächenbedarfe stammen, versorgt die Solarenergie mehr als die Hälfte des Energiesystems mit CO₂-freier Energie (Faulstich et al. 2016). Dennoch gestalten sich sowohl die Inanspruchnahme von Flächen als auch die erwarteten Pachtpreissteigerungen moderat im Vergleich zu den Entwicklungen der vergangenen Jahre im Energiepflanzenanbau. Es bleibt festzuhalten, dass für das Pachtpreisniveau in erster Linie die Großviehdichte und dann die Biogasanlagendichte entscheidend sind, eine Flächenbelegung durch PV-FFA dagegen selbst im 100%- Szenario für eine Erneuerbare Energieversorgung in Niedersachsen 2050 von untergeordneter Bedeutung wäre.

Das ZBG hat zusätzlich abgeschätzt, ob bei Co-Nutzung von Land durch PV und Agrarwirtschaft in APV-Anlagen weniger Pachtpreisauswirkungen zu erwarten wären. Es stellt sich aber heraus, dass Stand heute, die Installation von APV-Anlagen statt klassischer PV-FFA auf landwirtschaftlichen Flächen keine Entlastung bei den Pachtpreiseffekten erwarten lässt, da die Wirtschaftlichkeit der Landnutzung unter APV gemindert wird. Zudem müsste aufgrund geringerer elektrischer Erträge pro Fläche insgesamt mehr Fläche für den gleichen Stromertrag genutzt werden.

3 Kombinierte Solar-Agrar-Nutzung in Niedersachsen

3.1 Vermeidung von Flächenkonkurrenz

Eine Möglichkeit, Nutzungskonkurrenzen zwischen Landwirtschaft und Energiegewinnung zu reduzieren könnte die Agrarphotovoltaik (auch: Agro- oder Agri-(photo)voltaik, APV) sein. APV-Anlagen ermöglichen eine kombinierte Landnutzung zur Gewinnung von Nahrungsmitteln oder nachwachsenden Rohstoffen und von Solarenergie. Dies bietet mehrere Vorteile:

- Durch die simultane Nutzung kann die Flächeneffizienz erhöht werden, d.h. die Summe der landwirtschaftlichen und energetischen Flächenerträge einer APV-Anlage übersteigt die Erträge, die separate landwirtschaftliche und FFPV-Flächen erzielen würden.
- Die APV-Flächen gehen nicht als landwirtschaftliche Nutzfläche verloren, sondern stehen weiterhin für die landwirtschaftliche Produktion zur Verfügung.
- APV-Anlagen können so designt werden, dass sie eine positive Wirkung auf den Anbau von landwirtschaftlichen Kulturen haben. Das kann z. B. eine Nutzbarmachung des Standorts für Sonderkulturen sein oder auch verbesserter Wetterschutz oder Verdunstungs- und Wassermanagement. Insbesondere könnte die APV eine technische Lösung für eine erhöhte Klimawandelresilienz der Landwirtschaft in ariden Gebieten und zukünftig auch in Niedersachsen bieten.
- Die Aufhebung der Flächenkonkurrenz zur Landwirtschaft durch APV würde das Potenzial der in Niedersachsen und Deutschland für eine solare Energieversorgung zur Verfügung stehenden Flächen erheblich erweitern und so die Produktion von Erneuerbaren Energien in größerem Umfang als bisher möglich machen.

Im nachfolgenden Kapitel evaluieren wir aktuelle und zukünftige Möglichkeiten zur APV-Nutzung in Niedersachsen. Wir verwenden die am ISFH entwickelte Software DAIDALOS (Holst et al. 2013) für die Berechnung von Solarerträgen und Lichtdurchlässigkeit von verschiedenen APV-Systemen. Als Lichtquelle werden im Gegensatz zu der in Kapitel 2 verwendeten Jahreslichtquelle stündliche Lichtquellen verwendet, welche jedoch nach demselben Modell erstellt wurden. Wesentliche Inhalte vor allem der pflanzenbaulichen Aspekte wurden im Rahmen des Unterauftrags des ZBG erarbeitet (Hübner und Hardeweg 2020) .

3.2 Technologische Aspekte

Stand der Technik

In mehreren Ländern mit unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen wurden bis heute (2020) APV-Anlagen realisiert. Alle bisher gebauten Anlagen dienen dabei eher Forschungs- oder Demonstrationszwecken. Neben der erhöhten Landnutzungseffizienz steht in heißen und trockenen Regionen häufig auch eine Verbesserung des Mikroklimas durch die Teilverschattung unter der PV-Anlage im Mittelpunkt der Forschung. Auch die bisher größte bekannte APV-Anlage mit einer Leistung von 700 MWp in China wurde für diesen Zweck konstruiert (Weselek et al. 2019). Messergebnisse haben gezeigt, dass APV zu Verbesserungen für den Anbau bestimmter Kulturen in ariden Gebieten führen kann oder diesen überhaupt erst ermöglicht (Adeh et al. 2018; Hübner und Hardeweg 2020).

APV-Anlagen können sehr unterschiedlich ausgeführt sein (Weselek et al. 2019; Hübner und Hardeweg 2020). Aus dieser Vielfalt wählen wir drei Anlagendesigns aus (vgl. Abb. 5). Die drei Designs

unterscheiden sich signifikant in Bauform und Anlagentechnik. Ausschlaggebend für die Auswahl war, dass die Umsetzung der drei Konzepte bereits in Deutschland demonstriert wurde:

- 1. Fest installierte bifaziale Module in Süd-Süd-West-Ausrichtung auf einer hochgesetzten Unterkonstruktion nach Beispiel der APV-RESOLA-Versuchsanlage in Heggelbach, BW (Schindele et al. 2020), siehe Abb. 5 a)
- 2. 1-Achsen-Nachführungssysteme in Nord-Süd-Reihen mit bifazialen Modulen nach Beispiel der Versuchsanlage der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, BY (Beck 2019), siehe Abb. 5 b)
- 3. Fest installierte vertikale bifaziale Module in Ost-West-Ausrichtung in Nord-Süd-Reihen nach Beispiel der Next2Sun-Demonstrationsanlage in Dirmingen, SL (Hildebrandt und Zwosta 2019), siehe Abb. 5 c)







Abb. 5: Beispiele für APV-Demonstrationsanlagen in Deutschland. a) APV-Anlagentyp 1, "Heggelbach" (Foto: Hofgemeinschaft Heggelbach); b) APV-Anlagentyp 2, "Weihenstephan" (Foto: Michael Beck); c) APV-Anlagentyp 3, "Dirmingen" (Foto: Next2sun GmbH).

Alle Anlagentypen verwenden bifaziale Si-Solarmodule, das heißt, dass beide Seiten des Solarmoduls Licht einsammeln und daraus elektrische Energie produzieren können. Bifaziale Module waren bis vor wenigen Jahren nur für Nischenanwendungen verfügbar. Gerade in Gegenden mit hoher Albedo, z. B. in sandigen Regionen auf der arabischen Halbinsel, können bifaziale Module in großen Parks zu einem signifikanten Mehrertrag führen. Einen Schub bekam die Anwendung von bifazialen Solarmodulen mit der Einführung der sogenannten PERC+-Technologie¹, bei der durch einen strukturierten Rückseitenkontakt auch die Standard-PERC-Solarzelle bifazial gestaltet werden kann (Dullweber et al. 2016; Dullweber et al. 2018). Heute (2020) sind bifaziale Module für den Massenmarkt verfügbar. In APV-Anlagen, in denen die Module in der Regel höher und in größerem Abstand zueinander als in Standard-PV-FFA installiert werden, fällt die Ertragssteigerung durch die Licht sammelnde Rückseite vergleichsweise hoch aus, so dass sich der Einsatz der geringfügig teureren bifazialen Module in diesen Anlagen in der Regel rentiert.

Optische Simulationen von APV-Anlagen mit DAIDALOS

Mit der am ISFH entwickelten Raytracing-Software DAIDALOS können nicht nur Erträge von Solarmodulen, sondern auch die Lichtverteilung in ihrer Umgebung simuliert werden. Die Software ermöglicht viele verschiedene Anwendungen über Längenskalen von sieben Größenordnungen hinweg,

_

¹ PERC: Passivated Emitter and Rear Contact, marktbeherrschendes Zellkonzept für Si-Solarzellen

von der Strahlverfolgung von Gebäudefassaden bis hin zur Strahlverfolgung von Solarzellen-Textur-Elementen. Für die APV können mit DAIDALOS sowohl die Solarerträge verschiedener Anlagentypen als auch die für den Pflanzenertrag wichtigen Lichtverhältnisse am Boden bestimmt werden. Aus den Ergebnissen der optischen Simulation lassen sich Rückschlüsse für Anlagendesign und Feldfruchtanbau für die APV in Niedersachsen ableiten.

Wir benutzen DAIDALOS, um Erträge und Lichtverteilung für die drei verschiedenen APV-Anlagendesigns unter niedersächsischen Einstrahlungsbedingungen zu ermitteln. Wir verwenden wie bei den PV-FFA-Anlagen in Kapitel 2 für alle Simulationen dieselbe Tageslichtquelle, die aus gemessenen Einstrahlungsprofilen am Standort Emmerthal abgeleitet wurde. Für die Solarmodule haben wir je nach APV-Anlage angenommen, dass diese eine Leistung von 400 Wp (Anlagentyp "Dirmingen") bzw. 300 Wp (bei kleinerer Modulfläche) aufweisen. Die gewählten Simulationsdomänen verfügen periodische Randbedingungen. Auf diese Weise können die Licht- und Schattenverhältnisse im inneren Bereich der APV-Anlagen bestimmt werden, Randeffekte werden nicht betrachtet. Verschattungen durch die Aufständerung werden in den Simulationen vernachlässigt. Einzelheiten zu den verwendeten Simulationsparametern sind in Tab. 7 angegeben.

Die Simulation liefert als Output den jährlichen Ertrag pro Solarmodul in kWh, die photosynthetisch aktive Strahlung auf der bewirtschafteten Bodenfläche *PAR* in mol/m² und – als stündliches Mittel – die zugehörige Photonenstromdichte *PFD* in µmol/(m²s), jeweils für die angenommenen niedersächsischen Einstrahlungsbedingungen. Beide Messgrößen, *PAR* und *PFD*, werden ortsaufgelöst ermittelt, d.h. die Simulation ermöglicht auch eine Aussage über die Homogenität der Einstrahlungsbedingungen unterhalb des Solarkollektors.

Tab. 7: Vergleich der Anlagentypen

Parameter	Anlagentyp 1 "Heggelbach"	Anlagentyp 2 "Weihenstephan"	Anlagentyp 3 "Dirmingen"
Abstand zwischen den Modulreihen	10 m	7 m	10 m
Modulbreite	1 m	1 m	1,024 m
Modullänge	1,675 m	1,59 m	2,024 m
Aufstellhöhe	5 m	3,6 m	1 m
Simulations- domänenlänge (Nord-Süd)	10 m	7 m	10 m
Simulations- domänenbreite (Ost-West)	2,06 m	2,06 m	2,06 m
Aufstellwinkel	20°	nachgeführt	90°
Simulations- umgebung			

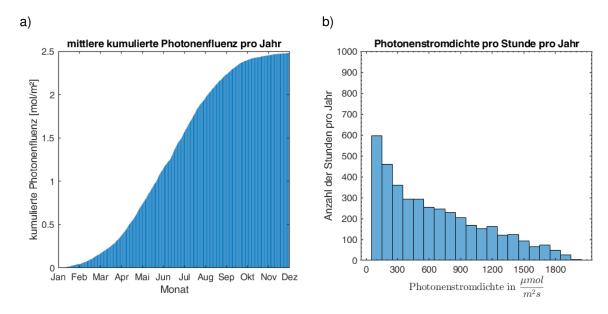


Abb. 6: Freie Fläche a) kumulierte Photonenfluenz, b) Photonenstromdichte

Abb. 6a zeigt die kumulierte Photonenfluenz auf freier Fläche im Jahresverlauf. Ohne Verschattungen beträgt die gemittelte Fluenz 2,48 mol/m². In Abb. 6b ist die Anzahl der Stunden bei entsprechender Photonenstromdichte aufgetragen.

Dabei wurde die ankommende photosynthetisch aktive Strahlung in Bereiche zu je 100 µmol/(m²s) zusammengefasst, wobei bei einem Wert von 50 µmol/(m²s) gestartet wird. Der Lichtsättigungspunkt von typischen C3-Pflanzen im Agrarbau liegt im Bereich zwischen 1300 µmol/(m²s) und 1600 µmol/(m²s). Auf freier Fläche kommen an 504 Stunden im Jahr eine Photonenstromdichte von mehr als 1300 µmol/(m²s) und an 191 Stunden eine Photonenstromdichte von mehr als 1600 µmol/(m²s) an.

APV-Typ "Heggelbach": Fest installierte Module in SSW-Ausrichtung

Die Anlage besteht aus festinstallierten bifazialen Modulen, die in Süd-Süd-West-Ausrichtung mit 20° Neigung in Reihen von zwei Modulen übereinander auf einer hochgesetzten Unterkonstruktion installiert sind. Die Durchfahrtshöhe beträgt 5 m, der Abstand zwischen zwei Solarmodulreihen beträgt 10 m. Die installierte PV-Leistung pro Landfläche beträgt 600 kW/ha. Die gesamte Unterkonstruktion steht auf Stützen, die in einem Raster von 19 m × 14 m aufgeteilt sind. Daraus resultieren eine Durchfahrtsbreite von 18 m in Hauptfahrtrichtung und 12 m in Nebenfahrtrichtung, die eine Bewirtschaftung der Fläche unter der Anlage ermöglichen.

Die PV-Anlage erzielt einen Stromertrag von 0,66 MWh/ha. Der Ertrag pro Solarmodul liegt damit 22 % unter der Referenzanlage aus Kap. 2, bedingt durch die kleinere Modulfäche. Der Ertrag pro installierter Modulleistung liegt 4,1% über der Referenzanlage. Der Ertrag pro Landfläche liegt 40 % unter der Referenzanlage.

Abb. 7a zeigt die kumulierte Photonenfluenz unter den Solarmodulen im Jahresverlauf. Die über die Fläche gemittelte Fluenz unter der APV-Anlage beträgt 1,55 mol/m² im Jahr. Das sind 37,5% weniger als auf einer Referenzfläche ohne Solaranlage gemessen werden. In der APV-Anlage steht wegen Teilverschattung durch Solarmodule somit 37,5% weniger photosynthetisch aktive Strahlung für die Pflanzen zur Verfügung. Abb. 7 zeigt eine Verteilung der im Jahresverlauf erzielten Stundenmittel der Photonenflussdichte. Unter der APV-Anlage kommt im Mittel an 219 Stunden im Jahr eine Photonenstromdichte von mehr als 1300 μ mol/(m²s) und an 78 Stunden eine Photonenstromdichte von mehr als 1600 μ mol/(m²s) an.

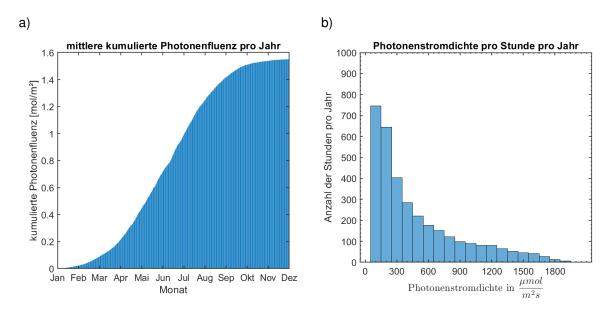


Abb. 7: Anlagentyp "Heggelbach": a) kumulierte Photonenfluenz, b) Photonenstromdichte

Abb. 8 zeigt die räumliche Verteilung der Einstrahlung unter APV-Anlagen. Die Abzisse gibt die Position entlang einer Modulreihe an, die Ordinate die Position zwischen zwei Modulreihen. Insgesamt wurde die Simulationsdomäne in 60 Felder aufgeteilt, in denen jeweils der Lichteintrag pro Feld ausgewertet wurde. Aufgetragen ist jeweils die Anzahl der Stunden, an denen im Stundenmittel eine Photonenflussdichte von 1300 μ mol/(m²s) (Abb. 8a) bzw. 1600 μ mol/(m²s) (Abb. 8b) überschritten wird. Es zeigt sich, dass sich die laterale Verteilung des Photonenflusses unter dieser APV-Anlage um bis zu 59% bei der Anzahl der Stunden mit einem Photonenfluss von über 1300 μ mol/(m²s) unterscheidet. Die laterale Verteilung der Anzahl der Stunden mit einem Photonenfluss von über 1600 μ mol/(m²s) unterscheidet sich noch stärker, um bis zu 90%.

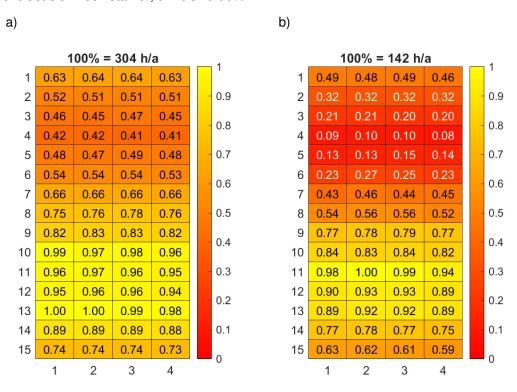


Abb. 8: Anlagentyp "Heggelbach" Photonenflussdichte von a) 1300 µmol/(m²s), b) 1600 µmol/(m²s)

Abb. 9 zeigt den täglichen Verlauf der PV-Modulleistung des Anlagentyps "Heggelbach". "Modulreihe 1" und "Modulreihe 2" bezeichnen dabei jeweils die unteren und die oberen Module innerhalb einer Reihe. Durch die Ausrichtung in Richtung Süd-Süd-West wird ein tägliches Leistungsmaximum zur späten Mittagszeit erreicht. Die Rückseite der bifazialen Module erzeugt zusätzlich noch einmal 18,4% des Vorderseitenertrags.

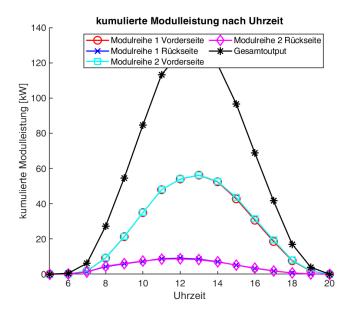


Abb. 9: Anlagentyp "Heggelbach" Täglicher Verlauf der PV-Modulleistung

In einer zweiten Simulation wurde der Anlagentyp "Heggelbach" mit größeren Abständen zwischen den PV-Modulen durchgeführt, so dass eine Flächenbelegung von 75% im Vergleich zur Demonstrationsanlage betrachtet wurde. Bei dieser Variation steigt die unter den PV-Modulen ankommende Photonenfluenz um 25% auf 1,94 mol'/m². Mit Abweichungen in der Flächenverteilung von bis zu 43,4% bei der Anzahl der Stunden mit einem Photonenfluss von über 1300 μ mol/(m²s) und bis zu 79% bei einem Photonenfluss von über 1600 μ mol/(m²s) wird die laterale Einstrahlungsverteilung unter den PV-Modulen durch die geringere Flächenbelegung kaum verändert.

Zusammengefasst bietet der Anlagentyp "Heggelbach" einen hohen Solarertrag und gleichzeitig eine recht gleichmäßige Verteilung der Einstrahlung unter der APV-Anlage. Ein Nachteil von Anlagen dieser Art ist die nötige Abwägung zwischen Durchfahrtsbreite und konstruktivem Aufwand. Die Anlage in Heggelbach wurde im Rahmen eines Forschungsprojekts als erste ihrer Art in Deutschland geplant und gebaut, wobei der Fokus auf eine große Durchfahrtsbreite gelegt wurde, was mit viel Materialeinsatz in der Aufständerung erkauft wurde. Derzeit entwickeln mehrere Firmen Aufständerungssysteme, die für bestimmte Feldfrüchte schon praktikable Durchfahrtsbreiten von bis zu 15 m bei wesentlich weniger Materialeinsatz für die Unterkonstruktion ermöglichen sollen (Leitner 2020). Welche Preise sich damit am Ende erzielen lassen, ist noch nicht abschätzbar. Tendenziell bedeuten Aufständerungen in großer Höhe immer einen konstruktiven Mehraufwand bei der Errichtung der PV-Anlage zur Bewältigung der mit der Aufbauhöhe zunehmenden Windlast.

APV-Typ "Weihenstephan": Nachgeführte Module in O/W-Ausrichtung

Die Anlage besteht aus bifazialen Modulen, die auf einer festen, hochgesetzten Nord-Süd-Achse montiert sind und dem Sonnenverlauf entsprechend von Osten nach Westen nachgeführt werden. Die

maximale Neigung beträgt in beide Richtungen 45°. Die Durchfahrtshöhe beträgt 3,6 m, die maximale Durchfahrtsbreite 7 m. Die installierte PV-Leistung pro Landfläche beträgt 857 kW/ha.

Die PV-Anlage erzielt einen Stromertrag von 1,15 MWh/ha. Der Ertrag pro Solarmodul liegt damit 6,2 % unter der Referenzanlage aus Kap. 2. Der Ertrag pro Landfläche liegt 6 % über der Referenzanlage.

Abb. 10a zeigt die kumulierte Photonenfluenz unter den Solarmodulen im Jahresverlauf. Die über die Fläche gemittelte Fluenz unter der APV-Anlage beträgt 1 mol/m² im Jahr. Das sind 60% weniger als auf einer Referenzfläche ohne Solaranlage gemessen werden. In der APV-Anlage steht durch Teilverschattung durch Solarmodule somit 60% weniger photosynthetisch aktive Strahlung für die Pflanzen zur Verfügung. Abb. 10b zeigt eine Verteilung der im Jahresverlauf erzielten Stundenmittel der Photonenflussdichte. Dabei wurde die ankommende photosynthetisch aktive Strahlung in Bereiche zu je 100 μ mol/(m²s) zusammengefasst, wobei bei einem Wert von 50 μ mol/(m²s) gestartet wird. Der Lichtsättigungspunkt von typischen C3-Pflanzen im Agrarbau liegt im Bereich zwischen 1300 μ mol/(m²s) und 1600 μ mol/(m²s). Unter dieser APV-Anlage kommt im Mittel an 154 Stunden im Jahr eine Photonenstromdichte von mehr als 1300 μ mol/(m²s) und an 57 Stunden eine Photonenstromdichte von mehr als 1600 μ mol/(m²s) an.

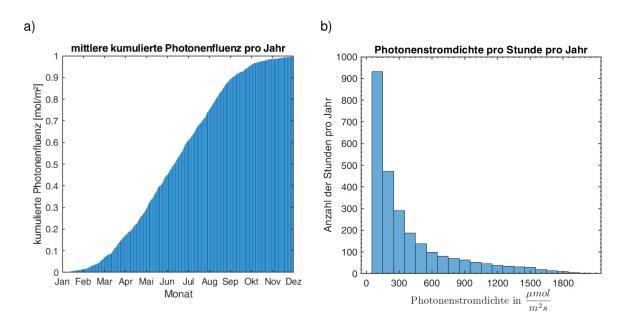


Abb. 10: Anlagentyp "Weihenstephan" a) kumulierte Photonenfluenz, b) Photonenstromdichte

Abb. 11 zeigt die räumliche Verteilung der Einstrahlung unter der APV-Anlage des Typs "Weihenstephan". Es zeigt sich, dass sich die laterale Verteilung des Photonenflusses unter dieser APV-Anlage um bis zu 38,5% bei der Anzahl der Stunden mit einem Photonenfluss von über $1300 \ \mu mol/(m^2s)$ unterscheidet. Die laterale Verteilung der Anzahl der Stunden mit einem Photonenfluss von über $1600 \ \mu mol/(m^2s)$ unterscheidet sich noch stärker, um bis zu 76%.

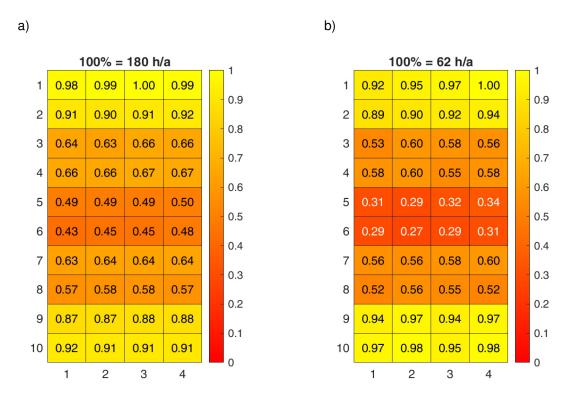


Abb. 11: Anlagentyp "Weihenstephan" Photonenflussdichte von a) 1300 μmol/(m²s), b) 1600 μmol/(m²s)

Abb. 12 zeigt den täglichen Verlauf der PV-Modulleistung des Anlagentyps "Weihenstephan". "Modulreihe 1" bezeichnet die östlich und "Modulreihe 2" die westlich in einer Reihe angebrachten Module. Durch den von Osten nach Westen nachgeführten Aufbau wird auch am Vor- und Nachmittag mehr Strom als beim Anlagentyp "Heggelbach" produziert und die PV-typische Mittagsspitze fällt weniger signifikant aus. Dieses Einspeiseprofil könnte gegenüber der Referenzanlage zu Vorteilen bei der Vermarktung des erzeugten Stroms führen.

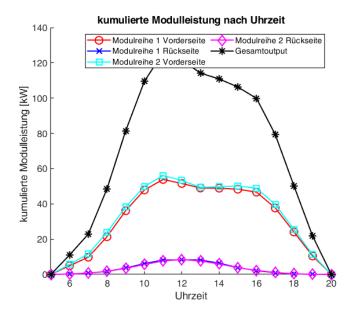


Abb. 12: Anlagentyp "Weihenstephan" Täglicher Verlauf der PV-Modulleistung

In einer zweiten Simulation wurde der Abstand zwischen den Modulreihen von 7 m auf 10 m erhöht. Bei dieser Variation steigt die unter den PV-Modulen ankommende Photonenfluenz um 42,5% auf 1,43 mol'/m². Dadurch, dass durch eine Erhöhung des Abstandes gerade in der Mitte zwischen den Modulreihen der ankommende Photonenfluss steigt, in den schon stärker verschatteten Bereichen aber nicht, wird die laterale Verteilung des ankommenden Photonenflusses unter den Modulen noch inhomogener.

Zusammengefasst kann mit dem Anlagentyp "Weihenstephan" durch die Nachführung der PV-Module ein hoher PV-Ertrag mit einem günstigen Einspeiseprofil erreicht werden. Durch die Nachführung werden bestimmte Bereiche der Fläche zwischen den Modulreihen mehr abgeschattet als andere. dadurch ist die laterale Verteilung der Einstrahlung unter der APV-Anlage inhomogener als beim Anlagentyp "Heggelbach". In den stark verschatteten Bereichen sind bei einer ähnlichen Anlage erhebliche Agrarertragseinbußen festgestellt worden (Valle et al. 2017). In derselben Studie wurde auch gezeigt, dass sich der Agrarertrag mit einem angepassten Betriebsmodus der nachgeführten PV-Paneele signifikant steigern lässt. Dazu wurden in den Wachstumsphasen in Frühjahr und Sommer die Solarmodule in den Morgen- und Abendstunden parallel zur Sonneneinstrahlungsrichtung gedreht, so dass die Direktstrahlung möglichst ungehindert auf die Pflanzen trifft. Lediglich in der Zeit zwischen 11 und 15 Uhr wurden die Module auf maximalen Solarertrag hin senkrecht zur Einstrahlungsrichtung gestellt. Mit dieser modifizierten Betriebsweise konnten in der Studie am Standort Montpellier unter der APV-Anlage ähnliche Erträge erzielt werden wie auf der Referenzfläche ohne Anlage. Allerdings wird der höhere Agrarertrag mit einem Rückgang des PV-Ertrages um etwas mehr als 50% erkauft. Zusätzlich fehlen im Einspeiseprofil der Anlage die besonders attraktiven, weil von Standardanlagen nicht abgedeckten, Vor- und Nachmittagsstunden. Aus diesen Gründen scheint die streng angepasste Betriebsweise eher nicht vorteilhaft. Denkbar wäre auch eine gemischte Betriebsweise, in der den Pflanzen in besonders kritischen Wachstumsphasen mehr Licht zugestanden wird, an allen anderen Tagen aber der PV-Ertrag maximiert wird. An dieser Stelle besteht noch Forschungsbedarf.

APV-Typ "Dirmingen": Fest installierte vertikale Module in O/W-Ausrichtung

Die Anlage besteht aus in Reihen von vertikal aufgestellten, festinstallierten bifazialen Modulen. Die Reihen verlaufen auf einer Nord-Süd-Achse und sind dementsprechend Richtung Osten und Westen ausgerichtet. Der Reihenabstand und damit die maximale Durchfahrtsbreite betragen 10 m. Die installierte PV-Leistung pro Landfläche beträgt 395 kW/ha.

Die PV-Anlage erzielt einen Stromertrag von 0,435 MWh/ha. Der Ertrag pro Solarmodul liegt damit 1,2 % über der Referenzanlage aus Kap. 2. Der Ertrag pro Fläche liegt 60 % unter der Referenzanlage.

Die kumulierte Photonenfluenz über die Fläche gemittelte Fluenz unter der APV-Anlage in Abb. 13a beträgt 1,95 mol/m² im Jahr. Das sind 21% weniger als auf einer Referenzfläche ohne Solaranlage gemessen werden. In der APV-Anlage steht durch Teilverschattung durch Solarmodule somit 21% weniger photosynthetisch aktive Strahlung für die Pflanzen zur Verfügung. Abb. 13b zeigt eine Verteilung der im Jahresverlauf erzielten Stundenmittel der Photonenflussdichte. Dabei wurde die ankommende photosynthetisch aktive Strahlung in Bereiche zu je 100 μ mol/(m²s) zusammengefasst, wobei bei einem Wert von 50 μ mol/(m²s) gestartet wird. Der Lichtsättigungspunkt von typischen C3-Pflanzen im Agrarbau liegt im Bereich zwischen 1300 μ mol/(m²s) und 1600 μ mol/(m²s). Zwischen den Modulreihen dieser APV-Anlage kommt im Mittel an 393 Stunden im Jahr eine Photonenstromdichte von mehr als 1300 μ mol/(m²s) und an 152 Stunden eine Photonenstromdichte von mehr als 1600 μ mol/(m²s) an.

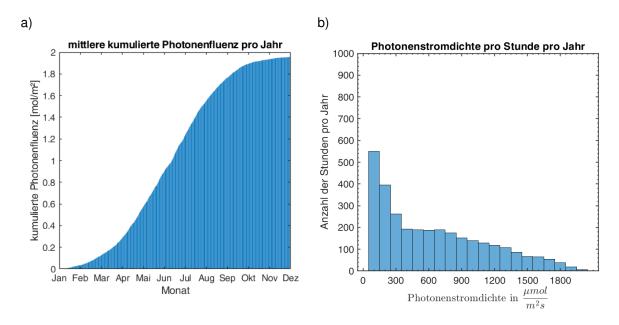


Abb. 13: Anlagentyp "Dirmingen" a) kumulierte Photonenfluenz, b) Photonenstromdichte

Abb. 14 zeigt wieder die räumliche Verteilung der Einstrahlung zwischen den PV-Modulreihen. Es zeigt sich, dass sich die laterale Verteilung des Photonenflusses bei dieser APV-Anlage um bis zu 28% bei der Anzahl der Stunden mit einem Photonenfluss von über 1300 μ mol/(m²s) unterscheidet. Die laterale Verteilung der Anzahl der Stunden mit einem Photonenfluss von über 1600 μ mol/(m²s) unterscheidet sich um bis zu 35%.

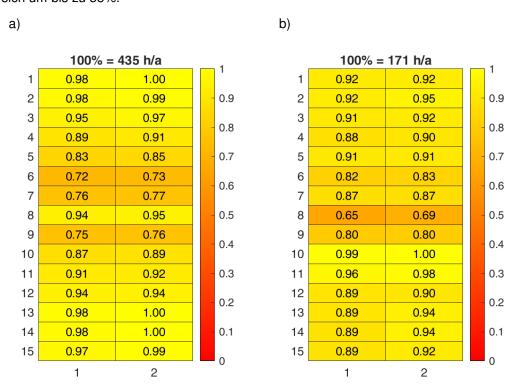


Abb. 14: Anlagentyp "Dirmingen": Photonenflussdichte von a) 1300 µmol/(m²s), b) 1600 µmol/(m²s

Abb. 15 zeigt den täglichen Verlauf der Modulleistung des APV Anlagentyps "Dirmingen". "Modulreihe 1" und "Modulreihe 2" bezeichnen dabei jeweils die unteren und die oberen Module innerhalb einer Reihe. Durch die Ost-West-Ausrichtung der bifazialen PV-Module ist die Modulleistung am Vor- und Nachmittag erheblich größer als in der Mittagszeit.

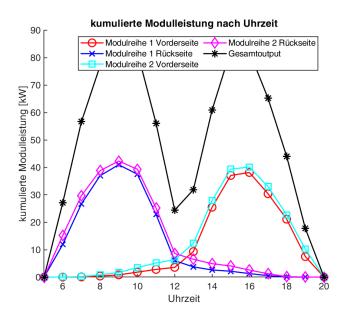


Abb. 15: Anlagentyp "Dirmingen": Täglicher Verlauf der PV-Modulleistung

In einer zweiten Simulation wurde der Abstand zwischen den Modulreihen von 10 m auf 28 m erhöht. Bei dieser Variation steigt die unter den PV-Modulen ankommende Photonenfluenz um 11% auf 2,17 mol'/m². Durch die Erhöhung des Abstandes zwischen den Modulreihen wird die laterale Verteilung des ankommenden Photonenflusses nicht wesentlich verändert.

Zusammengefasst bietet der Anlagentyp "Dirmingen" nur einen geringen Solarertrag pro Landfläche, dafür aber eine sehr gleichmäßige Verteilung der Einstrahlung zwischen den PV-Modulreihen. Die Gleichmäßigkeit dieser Verteilung kann noch einmal erheblich erhöht werden, wenn die Bereiche direkt neben den PV-Modulen vernachlässigt werden. Die vertikale Aufstellung der Module bietet neben dem Solarertrag außerdem noch Vorteile als Windschutz.

Der Anlagentyp 1 "Heggelbach" erreicht aufgrund der Abstände zwischen den Modulreihen auf gleich großer Fläche 60% des Stromertrags der Referenzanlage aus Kapitel 2. Aufgrund der Überbauung kommt mit 1,55 mol/m² etwa 62,5% der photosynthetisch aktiven Strahlung am Boden an. Die Süd-West-Ausrichtung bewirkt dabei eine relativ gleichmäßige Einstrahlungsverteilung unter und zwischen den PV-Modulen.

Der Anlagentyp 2 "Weihenstephan" erreicht durch die Nachführung der Solarmodule einen sehr hohen Stromertrag, der 6 % über dem Ertrag der Referenzanlage liegt. Die Nachführung hat für die landwirtschaftliche Nutzung den Nachteil, dass bestimmte Bereiche des Bodens unter und zwischen den PV-Modulen besonders häufig abgeschattet werden. Dadurch ist die laterale Verteilung in einem größeren Bereich als beim Anlagentyp 1 sehr inhomogen. Im Mittel kommen auf dem Boden bei diesem Anlagentyp 1 mol/m² an, was 40% der möglichen photosynthetisch aktiven Strahlung entspricht. Sowohl die Stärke als auch die Homogenität der Einstrahlung am Boden können durch eine angepasste Nachführung der PV-Module erhöht werden, was aber gleichzeitig auch eine Minderung des PV-Ertrags bewirkt.

Der Anlagentyp 3 "Dirmingen" erreicht durch die geringe Anzahl an verbauten PV-Modulen auf die Fläche bezogen nur ca. 40% des Stromertrags der Referenzanlage. Die Vorteile dieses Anlagentyps liegen jedoch in der hohen photosynthetisch aktiven Strahlung auf der Ackerfläche, welche mit ankommenden 1,95 mol/m² nur um 21% reduziert wird. Ein großer Teil dieser Verluste kann in direkter Umgebung der PV-Module verortet werden. Wird dieser Bereich für die landwirtschaftliche Nutzung vernachlässigt, ist die laterale Verteilung der Einstrahlung auf der verbleibenden Fläche noch gleichmäßiger. Zur genaueren landwirtschaftlichen Ertragsbestimmung sind genauere Simulationen und vermutlich auch Experimente im Feld nötig. Aus simulationstechnischer Sicht interessant ist die leichte Asymmetrie, die vermutlich auf unterschiedlichen Direktstrahlungsanteilen am Vor- und Nachmittag am Standort Emmerthal beruht. Für einen Standort mit einer höheren Direktstrahlung am Nachmittag, wie z. B. Cuxhaven, sollte sich eine Asymmetrie genau in die andere Richtung zeigen.

Weitere Vorteile dieses Anlagentyps sind die frei skalierbare Durchfahrtsbreite, keine Beschränkung in der Durchfahrtshöhe und der zusätzliche Windschutz durch die vertikale Ausrichtung. Zusätzlich wird durch die Ost-West-Ausrichtung der PV-Module ein hohes Mittagsmaximum vermieden und auf zwei kleinere Maxima am Vor- und Nachmittag aufgeteilt, was bei einer hohen Marktdurchdringung von (Standard-)PV-Anlagen zu Vorteilen bei der Vermarktung des Stroms dieses APV-Typs führen kann.

3.3 Pflanzenbauliche Aspekte

Aus pflanzenbaulicher Sicht sind sowohl mögliche Einschränkungen bei der Bewirtschaftung der Fläche als auch Auswirkungen auf das Wachstum der Pflanzen aufgrund veränderter Umweltfaktoren wichtige Aspekte der APV-Nutzung.

Alle APV-Anlagen benötigen Stützen im Feld, die in Reihenform angeordnet sind. Bei einer Kombination mit Ackerbau wird ein 0,5 - 1 m breiter Saum entstehen, der nicht bewirtschaftet werden kann. Der Abstand zweier Stützenreihen voneinander legt die Breite der zu bewirtschaftenden Fläche fest. Bei Anlagen vom Typ "Heggelbach" wird dieser Bereich von der APV-Konstruktion überspannt, weswegen sowohl der maximalen Durchfahrtsbreite als auch der Durchfahrtshöhe (aufgrund der mit der Höhe steigenden Windlasten) Grenzen gesetzt sind. Die Demonstrationsanlage in Heggelbach wurde mit der Maßgabe konstruiert, zu zeigen, was technisch möglich ist. Für zukünftige Anlagen ist davon auszugehen, dass diese schlanker konstruiert und besonders in der Durchfahrtshöhe etwas reduziert werden. Die Firma Leitner Energy aus Bozen beispielsweise entwickelt derzeit ein System auf Drahtseilbasis, das Durchfahrtsbreiten von 15 m ermöglichen soll (Leitner 2020).

Bei Anlagen vom Typ "Weihenstephan" und Typ "Dirmingen" können die in Nord-Süd-Reihen verlaufenden Modulreihen im Prinzip in beliebigen Abständen platziert und so an typische Arbeitsbreiten im Ackerbau angepasst werden. Allerdings ist dabei zu beachten, dass bei Konstruktionen mit viel Abstand zwischen den Reihen in der Regel keine homogene Verschattungssituation mehr erreicht wird. Nichtsdestoweniger können solche Anlagen immer noch einen Mehrwert für den Ackerbau bieten, z. B. als Erosionsschutz. Unterhalb der Modulreihen bzw. am Fuß der Stützen können sich Saumstrukturen ausbilden, die die Agrarlandschaft bereichern.

Die Auswirkungen der APV auf den Pflanzenbau hängen stark von den standörtlichen Einstrahlungsund Klimaverhältnissen ab. Als Beispiel sei eine Untersuchung des französischen Instituts für Agronomieforschung INRA in Montpellier genannt, die für den Anbau von Salat unter APV herausgefunden haben, dass Verschattungsraten bis zu 30% keinen Nachteil auf den Flächenertrag der Agrikultur haben (Marrou et al. 2013b). In der niedersächsischen Gemüseanbauregion rund um Ronnenberg bei Hannover liegt aber die jährliche Einstrahlung auf freiem Feld schon nur bei etwa 67% der Einstrahlung in Montpellier (PVGIS), weswegen in Ronnenberg grundsätzlich andere Salatsorten angebaut werden als in Südfrankreich. Die Auswirkung einer Teilverschattung durch eine APV-Anlage wird sich bei solch unterschiedlichen Lichtverhältnissen und unterschiedlichen Kulturen ebenfalls stark unterscheiden.

Mögliche Einflüsse abiotischer Faktoren, also Einflüsse von Klima, Licht und Boden, auf das Pflanzenwachstum sind ausführlich im angehängten Gutachten des ZBG (Hübner und Hardeweg 2020, 16 ff.) aufgeführt. Da im klassischen Freilandanbau Temperatur und Lichtverfügbarkeit nicht steuerbar sind, wird die Auswahl der Kulturpflanzen an die Standortbedingungen entsprechend angepasst. APV ermöglicht es auch, im Freilandbau eine Beeinflussung des Faktors Licht vorzunehmen. Im Vergleich zu anderen Anbauformen, insbesondere zum Unterglasanbau, gibt es dazu aber nur wenige Untersuchungen.

Ein kritischer Parameter für den Einfluss von Licht auf das Pflanzenwachstum ist der Lichtsättigungspunkt, der die Einstrahlungsbedingungen der höchsten Photosyntheseleistung angibt. Bei Photonenflussdichten unterhalb des Lichtsättigungspunkts kann das Lichtangebot das Pflanzenwachstum begrenzen. Bei Flussdichten oberhalb des Lichtsättigungspunkts wird das Wachstum stattdessen durch andere Faktoren (Wasser- und Nährstoffangebot, CO₂-Angebot) begrenzt. Interessant ist nach (ZBG 2020) der Bereich zwischen 1300 μ mol/(m²s) und 1600 μ mol/(m²s). Dort liegt der Lichtsättigungspunkt der C3-Pflanzen, zu denen bis auf Mais alle wichtigen Kulturen in Niedersachsen gehören.

Betrachtung der niedersächsischen Kulturen

Niedersachsen verfügt über 2,6 Mio. ha landwirtschaftliche Nutzfläche (Statistisches Bundesamt (Destatis)), davon werden etwa 2/3 als Ackerland genutzt. Die Ernährungsindustrie stellt nach der Automobilindustrie die zweitgrößte Branche in Niedersachsen dar. Innerhalb Deutschlands ist Niedersachsen gemessen an der Wertschöpfung das Agrarbundesland Nr. 1, wobei allerdings ein Großteil der Wertschöpfung nicht aus dem Ackerbau, sondern aus der Viehhaltung und dem verarbeitenden Gewerbe stammt. Gemessen an der landwirtschaftlichen Nutzfläche steht Niedersachsen knapp hinter Bayern auf Rang 2. Auf Niedersachsen entfallen dabei 15,3% der landwirtschaftlichen Nutzfläche in Deutschland.

Die fünf wichtigsten landwirtschaftlichen Hauptkulturen in Niedersachsen sind Mais, Winterweizen, Wintergerste, Kartoffeln und Roggen (Hübner und Hardeweg 2020). Alle diese Kulturen werden in Fruchtfolgen mit jährlichem oder zweijährlichem Wechsel der Feldfrüchte angebaut. Unter den Sonderkulturen sind in Niedersachsen unter anderem Spargel, Erdbeeren und Heidelbeere nennenswert. Die Sonderkulturen haben sehr unterschiedliche Standzeiten; Spargel wird etwa 10 Jahre lang am selben Standort angebaut, Erdbeeren maximal 2 Jahre lang, Heidelbeeren hingegen bis zu 20 Jahre (Hübner und Hardeweg 2020).

PV-Anlagen sind in der Regel für eine Nutzungsdauer von mindestens 20 Jahren ausgelegt. Da die Stromproduktion grenzkostenfrei ist, stellt ein möglichst langer Betrieb der PV-Anlage das wirtschaftliche Optimum dar. Für eine APV-Anlage gilt dasselbe. Daraus folgt, dass bei allen Kulturen mit Standzeiten von weniger als 20 Jahren mehr als eine Kultur während der Anlagennutzungsdauer unter der APV-Anlage angebaut wird.

Von den in (Hübner und Hardeweg 2020) untersuchten typischen niedersächsischen Kulturen eignen sich nach Fazit der AutorInnen am ehesten Kartoffeln, Erdbeeren und Heidelbeeren für einen Anbau in Teilverschattung, wie er unter einer APV-Anlage stattfinden würde. Da Kartoffeln nach vier und Erdbeeren nach zwei Jahren einen Fruchtwechsel benötigen, bräuchte es für beide Kulturen APV-geeignete Vor- und Nachfrüchte, von denen aus den oben genannten niedersächsischen Hauptkulturen auf den ersten Blick keine infrage kommt.

Bisherige Ergebnisse zu Heidelbeeren in Kombination mit APV haben sowohl Ertragssteigerungen als auch Ertragsminderungen gezeigt. Da Heidelbeeren zum Reifen viel Sonne brauchen, könnte eine Teilverschattung zu weniger Fruchtsüße und damit weniger attraktiven Früchten führen (Hübner und

Hardeweg 2020). Andererseits sind Heidelbeeren spätfrost- und trockenheitsempfindlich. Eine APV-Anlage mit integriertem Frostschutz oder einer fest installierten Beregnungsanlage könnte daher auch einen Mehrwert für den Heidelbeeranbau bieten. Eine durch die APV-Anlage verursachte Verzögerung der Reifung könnte zudem zu Vorteilen bei der Vermarktung als Frischobst führen, da die später reifen Früchte auch dann noch zur Verfügung stehen würden, wenn andere Felder bereits abgeerntet sind. Die langen Standzeiten von Heidelbeersträuchern und die Möglichkeit, nach Ende der Standzeit am selben Standort wieder Heidelbeeren anbauen zu können, passen zudem gut zu fest installierten APV-Anlagen.

Als weitere bedeutende Kultur in Niedersachsen ist der (in Hübner und Hardeweg (2020) nicht betrachtete) Kulturapfel zu nennen. Das Alte Land südlich der Elbe ist das größte Apfelanbaugebiet in Deutschland. Äpfel bevorzugen wie viele andere Obstbäume sonnige Standorte, der Anbau unter einer APV-Anlage ist aber grundsätzlich vorstellbar, da Äpfel auch an teilverschatteten Standorten gedeihen. Die APV-Anlage könnte zudem so konstruiert werden, dass sie zusätzliche Funktionen im Bewässerungsmanagement oder im Frost- und Hagelschutz übernimmt. Eine Herausforderung liegt wie bei vielen Ackerfrüchten in der langfristigen Nutzung, da der Apfelanbau im Nachbau, d.h. auf einer Fläche, auf der vorher auch bereits Äpfel angebaut wurden, aufgrund von Bodenmüdigkeit schwierig ist. Apfelkulturen können allerdings bis zu 20 Jahre alt werden und damit eine für PV-Anlagen wirtschaftliche Nutzungsdauer erreichen. Bodenbehandlungsmethoden, die einen Nachbau ohne oder mit möglichst wenig Ertragseinbußen auf derselben Fläche ermöglichen, sind Gegenstand aktueller Forschung (Müller und Feller 2018) und könnten den Anbau auf derselben (APV-)Fläche attraktiv machen. Insgesamt schätzen wir die Kombination von APV und Apfelanbau als vielversprechend ein.

Über den Anbau von Spargel in Teilverschattung ist bisher nichts bekannt. In (Hübner und Hardeweg 2020) wird dazu auf seine Herkunft aus der Steppe verwiesen und darauf beruhend eine geringe Schattentoleranz vermutet. Eine Besonderheit beim Spargelanbau ist jedoch, dass die Pflanzen erst nach dem Ende der Ernteperiode in der zweiten Junihälfte Licht für die Photosynthese nutzen. Die zuvor geerntete "Spargelfrucht", die im Frühjahr neu austreibenden Sprossen, nutzen kein Sonnenlicht zum Wachstum. Die Spargelpflanzen erreichen in der auf die Ernte folgenden Assimilationsphase Höhen von bis zu 2 m, was eine entsprechend hohe Installation der Solarmodule erfordern würde. Dass so etwas prinzipiell möglich wäre, zeigt der Anlagentyp "Heggelbach", in dem unter den Modulen eine Durchfahrtshöhe von 5 m erreicht wird. Eine speziell für den Spargelanbau konstruierte APV-Anlage würde sich von den hier untersuchten Anlagentypen unterscheiden, da das Sonnenlicht vor allem in einer bestimmten Jahreszeit, von Ende Juni bis September von den Pflanzen für Photosynthese genutzt wird. Die APV-Anlage sollte in dieser Zeit möglichst viel Licht auf die im Abstand von 2 m gepflanzten Reihenpflanzungen lassen, in der restlichen Jahreszeit spielt Verschattung hingegen keine Rolle. Herausfordernd ist auch beim Spargel das Erreichen einer kontinuierlichen Nutzung über die gesamte APV-Anlagenlebensdauer, da auch bei Spargelpflanzen nach 8-12 Jahren Standzeit der Nachbau aufgrund von Bodenmüdigkeit schwierig ist. Analog zu den Äpfeln wird aber auch beim Spargel an Bodenbearbeitungsmethoden geforscht, um eine kontinuierliche Nutzung ohne Ertragseinbuße zu ermöglichen. Insgesamt schätzen wir die Kombination von APV und Spargelanbau als untersuchenswert ein.

3.4 Wirtschaftliche Aspekte

Der große systemische Mehrwert von APV liegt in der Ermöglichung des Ausbaus von Erneuerbarer Energieerzeugung bei gleichzeitiger Erhaltung der landwirtschaftlichen Nutzfläche. Gleichzeitig sind APV-Anlagen aber technisch aufwändiger zu realisieren als Standard-PV-Anlagen. Für die großflächige Anwendung von APV muss daher ein Vergütungsmodell entwickelt werden, bei dem sowohl die Landwirtschaft als auch die Energieerzeugung konkurrenzfähig gegenüber der jeweiligen Einzelnutzung

der Fläche sind. Schindele et. al geben die mikroökonomischen volkswirtschaftlichen Kosten, die mit dem Erhalt von 1 ha Agrarfläche durch Errichtung einer APV-Anlage anstelle einer Standard-PV-Anlage verbunden sind, mit 9052 €/(ha·a) an (Schindele et al. 2020). Dem gegenüber gestellt werden landwirtschaftliche Erträge von 1959 €/(ha·a) für Weizen und 10707 €/(ha·a) für Kartoffeln. Diese Werte implizieren, dass sich die Errichtung von APV-Anlagen auf mikroökonomischer Ebene, also ohne Betrachtung des systemischen Mehrwerts für die Gesamtheit, volkswirtschaftlich lohnen kann, solange die richtigen Feldfrüchte für die Bewirtschaftung gewählt werden. Zu beachten ist dabei allerdings, dass die untersuchte Demoanlage "Heggelbach" von einem demeter-Betrieb bewirtschaftet wurde, der aufgrund der aufwändigeren Bewirtschaftung im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft (z. B. mehrmalige mechanische Methoden gegen Unkraut) auch mehr Umsatz pro Erntemenge und dadurch mehr Wertschöpfung pro Ackerfläche generiert.

In Niedersachsen typisch sind Erträge von 1000-5000 €/(ha·a) für Kartoffeln (Weyberg 2019) und 1200-1600 €/(ha·a) für Weizen (Schaper 2020). Von diesen Erträgen sind die Kosten für die Bewirtschaftung abzuziehen, um die Wertschöpfung zu errechnen. Auch muss berücksichtigt werden, dass die Notwendigkeit von Fruchtfolgen einen dauerhaften Einsatz von eher APV-geeigneten Kulturen wie der Kartoffel verhindert. Auch ohne die genauen betriebswirtschaftlichen Erlöse der Landwirtschaft zu kennen wird deutlich, dass der Einsatz von APV im Ackerbau für die lokalen Akteure ohne zusätzliche Unterstützung nicht wirtschaftlich sein kann.

Für den Obstbau könnte die Bilanz in Niedersachsen etwas besser aussehen, auch weil dort die agrarwirtschaftlichen Umsätze pro Fläche höher liegen. So wird z. B. im Apfelanbau in Deutschland durchschnittlich bei einem Ertrag von 300 dt/(ha·a) (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung 2019) und einem Verkaufspreis von 60 €/dt (European Commission - Agriculture and Rural Development 2020) ein Umsatz von 18000 €/(ha·a) erzielt. In Jahren mit extremem Spätfrost, wie 2017, kann sich dieser Ertrag um die Hälfte reduzieren. Eine APV-Anlage, die durch technische Vorrichtungen oder konstruktiv bedingt einen Schutz gegen solche Umwelteinflüsse bietet, liefert so einen beträchtlichen Mehrwert vor dem Hintergrund von aufgrund des voranschreitenden Klimawandels eventuell häufiger auftretenden extremen Wetterereignissen.

Unabhängig von der angebauten Kultur lässt sich sagen, dass der durch PV erzielbare monetäre Flächenertrag ein Vielfaches des landwirtschaftlichen Ertrags beträgt (vgl. auch Kapitel 2). So betrug z. B. der durchschnittliche Preis für direktvermarkteten Strom an der Strombörse EPEX Spot im Jahr 2019 36,64 €/MWh. Aufgrund der aktuellen Preisentwicklung bei der PV ist davon auszugehen, dass große Anlagen in Niedersachsen ab dem Jahr 2024 ohne Subventionen zu diesem Preis produzieren können. Die Referenzanlage aus Kapitel 2 würde dann einen Umsatz von 39938 €/(ha·a) erzielen. Jede Anpassung der Technik, z. B. für APV, die eine Anlage auch nur um 10% verteuert, würde schon mehr kosten, als sich durch die landwirtschaftliche Nutzung in den meisten Fällen wieder einholen ließe.

Da sich die verschiedenen APV-Anlagenkonzepte stark in der Bauart unterscheiden, ist es nicht möglich, eine allgemeingültige Kostenabschätzung für APV anzugeben. Nach Berechnungen von (Schindele et al. 2020) liegen die BOS(Balance-of-system)-Kosten der APV-Anlage, das sind die Investitionen ohne Module und Wechselrichter, in Heggelbach 116% über denen einer Standardanlage. Die Betriebskosten der APV-Anlage liegen hingegen 12,9% unter den Kosten einer Standardanlage. Nimmt man an, dass diese Kostenverhältnisse auch in Zukunft Bestand haben, dann ergeben sich mit dem in Kapitel 2 eingeführten Kostenmodell zukünftige Gestehungskosten von 57,37 €/MWh im Jahr 2024, 52,12 €/MWh in 2030 (gegenüber 31,98 €/MWh für die Freifläche) und 42,47 €/MWh in 2050 (gegenüber 24,97 €/MWh für die Freifläche). Es ist also keine signifikante Annäherung der APV-Stromkosten an die von Standardanlagen zu erwarten. Alternativen Aufhängungssystemen auf Drahtbasis wird allerdings das Potenzial nachgesagt, die Mehrkosten für die APV-Konstruktion auf etwa 10% der BOS-Kosten zu drücken (Leitner 2020).. Damit ließe sich aufgrund der gleichzeitigen Einsparungen bei den Betriebskosten und des leichten Mehrertrags pro installierter Leistung Preisparität zu den Standardanlagen erreichen, und die Nutzung von APV würde wirtschaftlich.

Eine Kostenabschätzung für APV-Anlagen des Anlagentyps "Weihenstephan" aufgrund veröffentlichter Literatur ist schwierig. Auch Gespräche mit der Herstellerfirma der Demoanlage in Weihenstephan bleiben diesbezüglich ohne Ergebnis. Allerdings ist die Anlagentechnik stark verwandt mit Ein-Achsen-Trackingsystemen, die derzeit von mehreren großen Solarherstellern für Solarparks auf der arabischen Halbinsel und in anderen sonnenreichen Gegenden propagiert werden. Für diese Anlagen existieren Abschätzungen, die von 10% Mehrkosten gegenüber Anlagen mit fest installierten Solarmodulen ausgehen (Vartiainen et al. 2019).

Die spezifischen Investitionen des Anlagentyps 3 liegen aktuell (2020) laut Hersteller 100 €/kW über denen einer vergleichbar großen Standardanlage (M. Probst und B. Volz 2020). Die Gründe dafür sind die Preise für bifaziale Module, die über denen der Standardmodule liegen, höhere Materialstärken in der Aufständerung, die erhöhte Windlasten zu tragen hat, sowie die Notwendigkeit, höhere Verkabelungslängen zu verbauen, was sich aus der Anlagengeometrie ergibt.

Begründet durch höhere Erträge pro installierter Leistung, vermutlich wegen geringerer Betriebskosten und aufgrund höherer Erlöse des verkauften Stroms mit günstigerem zeitlichem Erzeugungsprofil, wird für ausgewählte Standorte eine mit Standardanlagen vergleichbare Eigenkapitalrendite in Aussicht gestellt (M. Probst und B. Volz 2020). Aus unserer Sicht ist diese Einschätzung sehr optimistisch. Bifaziale Module können prinzipiell ähnlich preiswert hergestellt werden wie monofaziale Module. Im Juli 2020 lagen allerdings allein die Preise für bifaziale Module pro kW 110 € über denen für Standardmodule (M. Schachinger 2020), wodurch sich die Rentabilität stark verringert. Da der Markt sehr volatil ist, kann dieser Wert aber auch nicht verwendet werden, um eine generelle Unrentabilität des Anlagentyps 3 abzuleiten.

3.5 Einschätzung des Potenzials für Niedersachsen

Agrophotovoltaik könnte den Landnutzungskonflikt zwischen erneuerbarer Energieerzeugung auf Basis von Photovoltaik und Landwirtschaft nachhaltig lösen. Der breite Einsatz von APV ist allerdings mit volkswirtschaftlichen Mehrkosten verbunden, da die landwirtschaftlichen Erträge der durch APV ermöglichten Agrarflächen die teurere PV-Anlagentechnik nicht ausgleichen können. Für einen Markthochlauf sind daher kurz- und mittelfristig Anreizprogramme notwendig, wie sie für klassische Freiflächen- oder Dachflächen-PV im EEG auch gewährt wurden. Da sie etwas geringere Betriebskosten haben und gleichzeitig pro installierter Leistung leicht höhere Solaranträge anfallen, könnten APV-Anlagen längerfristig Preisparität zu Standardanlagen erreichen, wenn die Mehrkosten für die APV-Systemkosten auf etwa 10% gedrückt werden können.

Von den bedeutenden in Niedersachsen angebauten Freilandkulturen scheinen aus heutiger Sicht vor allem Äpfel, Heidelbeeren und Spargel interessante Kandidaten für eine Evaluation von APV zu sein. Diese Kulturen bringen es gemeinsam auf eine Anbaufläche von etwa 17500 ha in Niedersachsen; gelänge es, auf 10% dieser Fläche eine Doppelnutzung mit APV zu realisieren, so würde das je nach APV-Anlagentyp eine installierte Leistung von 0,7 GW bis 1,5 GW bedeuten.

Ackerland überdachende APV-Anlagen erscheinen erst einmal weniger sinnvoll, weil die klassischen Fruchtfolgen in Niedersachsen mit Weizen, Mais, Zuckerrüben oder Raps oft Pflanzen enthalten, bei denen unter Teilverschattung deutliche Ertragseinbußen erwartet werden. Experimentell nachgewiesen wurde dies bisher allerdings noch nicht. Aufgrund des enormen Flächenpotenzials könnte eine Erprobung von APV auf Ackerflächen Sinn ergeben, auch wenn die Erfolgschancen auf ausreichenden landwirtschaftlichen Ertrag geringer sind. Aufgrund des fortschreitenden Klimawandels könnten auch in Niedersachsen in Zukunft andere Ressourcen als Licht, insbesondere Wasser, in der Landwirtschaft wachstumsbeschränkend wirken. In solch einem Wachstumsregime könnte die APV eine technische Möglichkeit darstellen, um durch eine reduzierte Verdunstung im Feld für höhere Erträge zu sorgen.

Für eine Nutzung auf dem Acker kommen eher zaunartige Anlagen des APV-Anlagentyps "Dirmingen" infrage. Diese Anlagen können in einem auf die Bewirtschaftung angepassten Reihenabstand installiert werden und so maximal kompatibel zum Ackerbau gestaltet werden. An windexponierten Standorten können die Anlagen einen gewissen Erosionsschutz bieten, zudem könnte der schmale, nicht bewirtschaftete Streifen unter den PV-Modulen ähnlich wie Randstreifen und Säume als Blühstreifen mit günstiger Umweltwirkung dienen. Die Mehrkosten der Konstruktion gegenüber Standard-PV-Anlagen könnten in einem zukünftigen Energiesystem mit viel PV-Anteilen vermutlich zumindest teilweise durch einen höheren Erlös bei der Vermarktung des Stroms kompensiert werden. Die Anlagen können zudem auf Grünland eingesetzt werden, ohne dass dessen Funktionen für das Ökosystem beeinflusst werden.

Für alle Anwendungsmöglichkeiten gilt, dass vor allem hinsichtlich des Einsatzes in der Praxis noch Forschungsbedarf besteht. APV-Versuchsanlagen in Niedersachsen könnten entscheidend zur genaueren Eingrenzung und Identifizierung von APV-Potenzialen beitragen.

4 Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf die Biodiversität und die menschliche Gesundheit

Grundlage für die Bewertung der Auswirkungen von PV-FFA auf die Biodiversität und das menschliche Wohlergehen war eine umfassende Literaturrecherche zu aktuellen Forschungsergebnissen sowie einzelnen zur Verfügung stehenden Gutachten aus den Genehmigungsverfahren von PV-FFA in anderen Bundesländern.

In Anlehnung an das Vorgehen in der Umweltprüfung wurden dabei Wirkfaktoren aus verschiedenen Projektphasen für die Bewertung herangezogen. Zu den Wirkfaktoren zählen sämtliche Sachverhalte, Tätigkeiten und Eigenschaften eines Projektes, die bei Empfindlichkeit der Schutzgüter zu Auswirkungen auf Natur und Landschaft führen (RL 2001/42/EG). Sie wirken in unterschiedlicher Art, Intensität und Dauer, so dass zwischen bau-, betriebs- und anlagebedingten Wirkfaktoren unterschieden wird. Als baubedingte Wirkfaktoren gelten alle Faktoren, die während der Bauzeit und zeitlich begrenzt wirken. Dies sind unter anderem Baufelder, Material- und Maschinenstellplätze, Baustellenverkehr oder Baubeleuchtung. Anlagebedingte Wirkfaktoren gehen Vorhabensbestandteilen aus und wirken über die Bauphase hinaus. Zu den Vorhabensbestandteilen gehören sämtliche Anlagenteile, aber auch benötigte Zuwege und sonstige benötigte Infrastruktur. Betriebsbedingte Wirkfaktoren sind Einflüsse, die nur temporär aufgrund des Betriebs der Anlage wirken (BfN 2019).

Generell gilt, dass nicht alle der potenziell möglichen Auswirkungen tatsächlich auftreten und ihre Intensität standortspezifisch unterschiedlich ist (vgl. Guerin 2017; Turney und Fthenakis 2011). Durch die Errichtung einer PV-FFA kommt es auf einer großen Fläche zu einer Veränderung der Vegetationsstruktur und des Mikroklimas. Diese Veränderungen können für die Tier- und Pflanzenarten der Ausgangssituation negative Folgen haben, gleichzeitig aber für andere Arten Potenziale bieten, bspw. bei der Errichtung einer PV-FFA auf einem Acker. Schließlich beeinflusst auch das anschließende Pflegemanagement die Güte und Schwere der Auswirkungen auf die Biodiversität entscheidend (Montag et al. 2016).

In den folgenden Unterkapiteln zeigt sich, dass die Datenlage zur Bewertung der Auswirkungen der PV-FFA auf die Schutzgüter des Naturhaushaltes sehr unterschiedlich ist. Allein hiermit ist die unterschiedliche Länge der Kapitel zu begründen. Sie lässt keine Rückschlüsse auf die Relevanz der potenziellen Auswirkungen bzw. des beschriebenen Konfliktfelds zu.

4.1 Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf Arten und Lebensgemeinschaften

Für die Errichtung von konventionellen PV-FFA werden rund 1 ha/ kWp Fläche benötigt (vgl. Kap. 2.1). Der tatsächliche Flächenbedarf ist u.a. von der installierten Leistung, dem Wirkungsgrad der verwendeten Modultypen, ihrer Anordnung und Aufständerung, sowie der Größe von integrierten Sonderflächen abhängig (Herden et al. 2009). Die Auswahl der Fläche und ihr aktueller ökologischer Wert entscheiden maßgeblich über die Auswirkungen auf die Biodiversität. Haben in anderen Ländern wie bspw. Brasilien die Entwaldung für geplante Photovoltaikanlagen negative Auswirkung auf die Biodiversität (Pimentel Da Silva und Branco 2018) oder in den USA die Begradigung der Oberfläche und die Entfernung der Vegetation (Hernandez et al. 2014; Macknick et al. 2013), so werden in Deutschland überwiegend landwirtschaftliche Flächen, versiegelte Flächen oder auch Konversionsflächen genutzt. Bei Aufstellungen auf intensiv genutzten Äckern und Grünländern oder auch Konversionsflächen kann durch den Bau einer PV-FFA ein positiver, hingegen auf extensiv

genutzten Äckern oder Grünländern ein negativer Effekt eintreten (Raab 2015; Wagegg und Trumpp 2015). Grundsätzlich können PV-FFA in intensiv genutzten Landschaften als Brut-, Rast- und Nahrungshabitat fungieren (Knipfer und Raab 2013; Raab 2015). Die Zuwanderung von Schmetterlingen und der Anstieg der Pflanzenvielfalt ist stark von Lieferbiotopen in der direkten Umgebung (möglichst unter 500 m) abhängig (Raab 2015).

4.1.1 Baubedingte Auswirkungen

Baubedingte Wirkungen treten kurzfristig bis zur Fertigstellung der PV-Anlage auf und sind daher teilweise vernachlässigbar (nicht "erheblich" im Sinne der Eingriffsregelung) (ARGE Monitoring PV-Anlagen 2007).

Während der Bauphase kommt es zu Bodenversiegelungen, bspw. durch die Errichtung von Baustraßen, Lager- und Abstellflächen. Des Weiteren werden durch den Baubetrieb Bodenumlagerungen, -durchmischungen und Verdichtungen hervorgerufen, u.a. durch Bau- und Transportfahrzeuge und die Verlegung von Erdkabeln, sowie durch möglicherweise durchgeführte Geländemodellierung (Hernandez et al. 2014). Durch die Baustellenfahrzeuge kommt es zu stofflichen Emissionen. Ebenfalls ist mit Schall- und Lichtemissionen, sowie mit Erschütterungen zu rechnen. Säugetiere meiden in der Regel die Baustelle (Herden et al. 2009).

Beim Rückbau von PV-FFA erfolgt eine Öffnung der Kabelschächte zur Entnahme der Erdkabel. Dieses ist mit einer Umlagerung des Bodens verbunden. Zur Demontage der Module ist wiederum der Einsatz von schweren Baustellenfahrzeugen notwendig, was wiederum Verdichtung, stoffliche Emissionen und Schallemissionen erwarten lässt.

4.1.2 Anlagebedingte Auswirkungen

Die anlagebedingten Auswirkungen auf die Biodiversität sind bei PV-FFA die bisher am besten untersuchten Wirkungen. Sie sind abhängig von der Höhe und der überschirmten Fläche der Module und der technischen Ausführung der Modultische (vgl. Herden et al. 2009).

Durch die Betriebsgebäude, Wege und die Aufständerung der Module kommt es zu Versiegelung. Diese kann durch Pfahlgründungen für die Modultische jedoch auf bis zu 1% der Gesamtfläche minimiert werden (UM BaWü 2019; Herden et al. 2009).

Bei der Analyse von PV-FFA an Verkehrswegen in Deutschland zeigte sich eine räumliche Überschneidung mit Lebensraumnetzen (unzerschnittene Freiräume und Biotopverbundachsen) bei 93% der Anlagen (Niemann et al. 2017), was die Relevanz dieser Flächen für den Biotopverbund unterstreicht. Durch Modellierungen konnte gezeigt werden, dass PV-FFA einen positiven Beitrag für die Vernetzung von Offenlandstandorten im Biotopverbund leisten können (Niemann et al. 2019). Vor allem auf lokaler Ebene können durch eine höhere Habitatqualität positive Vernetzungseffekte erzielt werden (Niemann et al. 2019). Diese Aussagen sind allerdings vor dem Hintergrund der heutigen Agrarlandschaft in Deutschland mit wenigen naturnahen Offenlandbiotopen zu sehen.

Vegetation

Mikroklimatische Veränderungen entstehen aufgrund der Beschattung und der Reduzierung des Niederschlags unter bzw. zwischen den Modulen (Landeck et al. 2014; Armstrong et al. 2016). Unter den Modulen wurden im Sommer bis zu 5,2 °C geringere und im Winter wärmere Temperaturen verglichen mit den Zwischenräumen oder Vergleichsflächen gemessen (Armstrong et al. 2016). Unter der Abtropfkante der Module kann es zu Bodenerosion kommen. Daraus entstehende Veränderungen der Pflanzenartenvielfalt sind nicht eindeutig belegt (Schindler et al. 2018). Durch unterschiedliche

Besonnung oder Beregnung bedingte Gradienten in der Vegetation waren in Untersuchungen von Herden et al. (2009) nicht festzustellen. Beschattungseffekte auf die Vegetation wurden durch Seidler et al. (2013) nachgewiesen, die in ihrer Studie Vegetation unterhalb der Module auf einem alten Deponiestandort untersuchten. Hierbei wurden Unterschiede in der Blühphänologie einzelner Arten, der Artenzusammensetzung und der Morphologie aufgrund der Beschattung und des verringerten Niederschlags festgestellt. Stoefer et al. (2013; 2014) fanden für 2013 tendenziell weniger Arten in den beschatteten Bereichen als in den nicht beschatteten Bereichen, während sie in 2014 vergleichbare Artenzahlen erhoben.

Bei Schnee können die Flächen unterhalb der Module schneefrei bleiben, was sich negativ auf die Vegetation durch die nicht gepufferte Witterung und positiv auf bestimmte Tierarten auswirken kann, die möglicherweise hier Futter finden können (Wagegg und Trumpp 2015). Finden Kleinsäuger hier im Winter Nahrung, so wirkt sich dies positiv auf die Nahrungskette und weitere Gilden, wie z. B. Greifvögel aus (Herden et al. 2009).

Das Potenzial zur Erhaltung und Erhöhung der Biodiversität zeigt die Betrachtung von elf PV-FFA in Südengland (Montag et al. 2016). Diese wiesen eine höhere Pflanzenartenvielfalt als die Kontrollflächen auf (Montag et al. 2016; vgl. auch Uldrijan et al. 2015; vgl. auch Vespalcova et al. 2015). Naturschutzorientiertes Beweidungsmanagement (Winter- und Frühjahrsbeweidung mit Schafen) erhöhte die Artenvielfalt zusätzlich (Montag et al. 2016). Auf vier anderen PV-FFA in England (Ansaat als Wildblumenwiese / Weide) wurden höhere Artenzahlen an krautigen Pflanzen als auf den entsprechenden Referenzflächen festgestellt (Parker und McQueen 2013). Auch in Deutschland konnte eine Zunahme der Pflanzenartenzahl mit zunehmendem Alter einer PV-FFA festgestellt werden (Stoefer et al. 2013).

Heuschrecken

Heuschrecken meiden tagsüber die beschatteten Bereiche unterhalb der Module (Herden et al. 2009). Auch Landeck et al. (2014) beschreiben eine Veränderung der Raumnutzung von Heuschrecken in den besonnten Bereichen der Modulzwischenräume, auf denen vor Anlagenbau Heuschrecken vorkamen. Neben trockenheitsliebenden Arten konnte dieser Effekt auch bei mesophilen und feuchtigkeitsliebenden Heuschreckenarten nachgewiesen werden (Herden et al. 2009). Bei einer fest installierten Solaranlage wurden mehr Veränderungen der Artenzusammensetzung von Arthropoden festgestellt, als bei einer nachgeführten Anlage (Suuronen et al. 2017).

Auf drei PV-FFA wurden von Herden et al. (2009) je Anlagenstandort zwischen sieben und acht verschiedene, auch gefährdete Heuschreckenarten erfasst. Des Weiteren konnte die bundesweit stark gefährdete Sumpfschrecke (*Mecostethus grossus*) nachgewiesen werden (Herden et al. 2009).

Avifauna

Auch die Avifauna reagiert unterschiedlich auf die neuen Strukturen aus PV-Modulen und ihren Aufständerungen in der Landschaft. Die Module werden durch Vögel vielfältig genutzt, z. B. als Singwarte, zum Ansitz oder zur Brut (Hübner et al. 2014; Neuling 2009; Tröltzsch und Neuling 2013; Visser 2016). Zusätzlich nutzen verschiedene Vogelarten die Zäune als Singwarte, zum Ansitz oder auch zur Nahrungsaufbewahrung (Herden et al. 2009; Neuling 2009; Tröltzsch und Neuling 2013; Hübner et al. 2014). Von Tröltzsch und Neuling (2013) wurden vor allem Nischen- und Halbhöhlenbrüter im Bereich der Module festgestellt. Von den Modulen gehen nach Herden et al. (2009) keine Irritationswirkungen aus und es wurden keine Kollisionsereignisse mit Vögeln festgestellt. Weiterhin konnten keine Stör- oder Scheuchwirkungen belegt werden, wobei die Autoren solche Wirkungen für einige Vogelarten durchaus für möglich erachten (Herden et al. 2009). Auch Feltwell (2013) stellte keine negativen Auswirkungen auf Vögel fest. Neuling (2009) beobachtete drei Höckerschwäne bei dem Versuch mit späterem Abbruch eine PV-Anlage anzufliegen. Die untersuchten Brutvögel hingegen zeigten kein auffälliges Verhalten (Neuling 2009). Kagan et al. (2014) stellten über einen Zeitraum von

zwei Jahren zahlreiche tote Vögel durch Traumata und Prädation an einer kalifornischen PV-Anlage fest. Die systematische Suche nach Totfunden von Vögeln in einigen anderen Studien konnte die These zu möglichen Kollisionsereignissen mit PV-FFA aber nicht bestätigen (Neuling 2009; Feltwell 2013; Visser 2016).

Vögel wiesen an elf PV-FFA in Südengland höhere Artenzahlen als auf Kontrollflächen auf; höhere Individuenzahlen als auf den Kontrollflächen konnten auf zwei von elf PV-FFA erhoben werden (Montag et al. 2016). Die höheren Individuen- und Artenzahlen lassen auf der PV-FFA bessere Möglichkeiten zur Nahrungssuche als in der Umgebung vermuten (Montag et al. 2016). Um die Artenvielfalt von Vögeln auf PV-FFA zu erfassen, haben Tröltzsch und Neuling (2013) Untersuchungen auf zwei, in Brandenburg errichteten Anlagen mit Daten vor der Errichtung und mit Referenzdaten durchgeführt. Auf der ersten Anlage in Finow wurden auf einer Teilfläche der PV-FFA kaum Veränderungen zum Artenspektrum vor der Installation der PV Anlage (sieben bzw. acht Brutvogelarten) und auf einer anderen Teilfläche starke Veränderungen (vier bzw. ein Brutvogel) festgestellt. Insgesamt wurden 13 Brutvogelarten auf der PV-FFA erfasst, auf der Referenzfläche nur neun Brutvogelarten, darunter aber einige wertgebende Arten der Trockenlebensräume halboffener und offener Landschaften. Für den Solarpark in Finow wurde eine Brutvogeldichte von 5,6 bzw. 3,3 Rev./10ha im Gegensatz zur Siedlungsdichte auf der Referenzfläche von 15 und 12,1 Rev./10ha festgestellt. Auf der Anlage in Lieberose wurden vor der Errichtung der PV-FFA sieben Brutvogelarten festgestellt, nach der Errichtung im Jahr 2009 nur noch drei. Die Bruthabitate lagen vor allem in den Randbereichen an Sonderstrukturen (vgl. auch Stoefer et al. 2013). Im Gegensatz hierzu wurden auf der entsprechenden Referenzfläche mehr als zehn Brutvogelarten nachgewiesen. Innerhalb des Solarparks wurde eine Verringerung der Bestandsdichte festgestellt.

Verdrängungseffekte in die umliegenden Flächen konnten an beiden Anlagen vor allem für Bodenbrüter und wertgebende Arten festgestellt werden, während Nischenbrüter gefördert wurden. Festzuhalten bleibt, dass die Untersuchungen von Tröltzsch und Neuling (2013) in sehr diversen und für den Naturschutz wertvollen Konversionsflächen durchgeführt wurden, so dass das Artenspektrum und die Siedlungsdichten in einer stark landwirtschaftlich geprägten Landschaft sicherlich geringer ausfallen würden. Im Gegensatz hierzu stehen Untersuchungen von DeVault et al. (2014), die mehr Vogelarten auf einer PV-FFA angrenzend an einen Flugplatz erfassten als auf dem Flugplatz selbst. Auch die Anzahl an beobachteten Vögeln war in der PV-Anlage doppelt so hoch. Von Montag et al. (2016) wurden signifikant höhere Arten- und Individuenzahlen von gefährdeten Vogelarten in PV-FFA nachgewiesen. Auch Herden et al. (2009) konnten bis zu zehn landesweit gefährdete Vogelarten auf den PV-FFA feststellen. Hohe Artenzahlen von Vögeln gefährdeter Arten konnten auch in verschiedenen Monitoringberichten belegt werden (Hübner et al. 2014; Lieder und Lumpe 2012; Stoefer und Burg 2012; Stoefer et al. 2013). Visser (2016) sieht das Potenzial von PV-FFA für die Nahrungssuche, Jagd und Brut von Vögeln gegeben, hält aber fest, dass dieses von den Ansprüchen der Vogelart abhängig sind.

(Wasser-)Insekten

Für (Wasser-)Insekten wird oft eine Attraktionswirkung der reflektierenden Moduloberflächen aufgrund der Erwärmung und Polarisation des Lichtes diskutiert. Ein erhöhtes Mortalitäts- oder Verletzungsrisiko konnte bisher nicht belegt werden (Herden et al. 2009; Landeck et al. 2014). Trotzdem (vgl. Herden et al. 2009), konnten Attraktionswirkungen und Nutzungen von Modulflächen bei aquatischen Insekten (z. B. Wasserwanzen) festgehalten, bei semiaquatischen Arten (z. B. Libellen, Köcherfliegen) und den "übrigen Arten mit engem Wasserbezug" nicht zweifelsfrei belegt werden (vgl. Herden et al. 2009)). Im Gegensatz hierzu konnten Horváth et al. (2010) feststellen, dass Eintagsfliegen (*Ephemeroptera*), Köcherfliegen (*Trichoptera*), Langbeinfliegen (*Dolichopodidae*) und Bremsen (*Tabanidae*) am meisten von den Solarmodulen angezogen wurden und hier häufiger Eiablage-Verhalten als über Oberflächen mit geringerem Grad an Polarisation (inkl. Wasser) zeigten. Die Verwechselung der Solarmodule mit Wasser kann zur ökologischen Falle in Folge von verringerter Reproduktion und erhöhter Mortalität für diese Arten werden (Horváth et al. 2010). Die Verwendung von Anti-Reflektion Überzügen verringerte die Anzahl an Bremsen und das Suchen nach Wasser signifikant (Száz et al. 2016). Allerdings

verringern solche Anti-Reflektion Überzüge das polarisierende Licht nur unter sonnigen Bedingungen und begünstigen so aquatische Insekten, während sie bei Bewölkung die negativen Auswirkungen verstärken (Száz et al. 2016). Für verschiedene Insektenarten, u.a. aquatische Insekten, konnte die Nutzung von Modulen zum Ausruhen und Aufwärmen nachgewiesen werden (Landeck et al. 2014). Dies bietet aufgrund einer verlängerten Aktivitätsphase einen Vorteil für die Arten, könnte allerdings auch zu einem erhöhten Mortalitätsrisiko aufgrund der guten Sichtbarkeit auf den Modulen führen.

Tagfalter

Das Vorkommen von Tagfaltern in PV-FFA ist maßgeblich von der Vegetation und insbesondere dem Vorhandensein von Nahrungspflanzen abhängig. PV-FFA können ähnliche Artausstattungen wie extensives Grünland aufweisen (Niemann et al. 2019). Die untersuchten PV-FFA von Montag et al. (2016) wiesen höhere Individuenzahlen an Tagfaltern und Hummeln auf, während die Anzahl an Arten in den meisten PV-FFA nicht höher als in den Kontrollflächen war. Bei der Vorgängerstudie zeigten zwei als Wildblumenwiese angesäte PV-FFA höhere Artenzahlen an Hummeln und Tagfaltern als die Kontrollflächen (Parker und McQueen 2013). Niemann et al. (2017), verglichen mit einem angrenzenden Grünland, ähnlich hohe Artenzahlen mit teilweise gefährdeten Arten auf einer PV-FFA nach. Landeck et al. (2014) erfassten die meisten Tagfalterarten und höchsten Individuenzahlen auf trockenwarmen Standorten, was die Relevanz des Standortes und einer blütenreichen Vegetation unterstreicht. Innerhalb der PV-FFA wurden die Falter oft in zaunnahen Saumstrukturen nachgewiesen (Hübner et al. 2014). Die Relevanz der Randbereiche der Anlage für Tagfalter konnte auch von Niemann et al. (2017) bestätigt werden, wobei diese teilweise mit Blühmischungen angesät waren. Mittels der Fang-Wiederfang-Methode wurden rege räumliche Wechsel von Tagfaltern zwischen einer PV-FFA und deren angrenzenden Vegetationsstrukturen belegt (Niemann et al. 2019). Für Tagfalter stellt die Einzäunung keine Barriere dar, größere Arten überfliegen den Zaun, während kleinere Arten durch den Zaun fliegen (Niemann et al. 2017). Auch Guiller et al. (2017) halten fest, dass mobile Tagfalterarten gut mit PV-FFA zurechtkommen: "For mobile species (...) the USSE was as easy to traverse as seminatural grassland and grassy linear elements".

Reptilien und Amphibien

Das Vorkommen von Reptilien auf PV-FFA ist von einer entsprechenden Lebensraumausstattung abhängig und wurde nur in wenigen Studien untersucht. Zaun- (*Lacerta agilis*) und Waldeidechsen (*Zootoca vivpara*) wurden nur vereinzelt und in den Randbereichen nachgewiesen (Landeck et al. 2014). Andere Studien erfassten adulte Tiere und Jungtiere der Zauneidechse (Knipfer und Raab 2013; Hübner et al. 2014; Stoefer und Burg 2012).

Auch Amphibien können die Flächen von PV-FFA nutzen, sofern Gewässer auf dem Gebiet der Anlage integriert sind. So konnten Hübner et al. (2014) Bergmolch (*Ichthyosaura alpestris*), Kreuzkröte (*Bufo calamita*), Laubfrosch (*Hyla arborea*) und Teichfrosch (*Pelophylax kl. esculentus*) auf einem strukturreichen Standort mit vielen Gewässern nachweisen. Zufallsbeobachtungen von Jungtieren verschiedener Amphibienarten sind ebenfalls belegt (Landeck et al. 2014). Die erfolgreiche Reproduktion von Kreuzkröten auf einer PV-FFA konnte durch Stoefer et al. (2013) belegt werden.

Säugetiere

Die Wirkungen von PV-FFA auf Säugetiere wurden bisher kaum systematisch untersucht, weshalb sich Nachweise oft auf Zufallsbeobachtungen stützen. Feldhase (*Lepus europaeus*), Reh (*Capreolus capreolus*), Eichhörnchen (*Sciurus vulgaris*), Fuchs (*Vulpes vulpes*) und Damwild (*Dama dama*) wurden auf PV-FFA festgestellt (Herden et al. 2009). Zusätzlich kann von einer Nutzung von Wildkaninchen (*Oryctolagus cuniculus*), Waschbär (*Procyon lotor*) und Marderarten ausgegangen werden (Landeck et al. 2014). Hasen und kleine Säugetiere wurden auch in Großbritannien nachgewiesen (Parker und McQueen 2013). Bei der Untersuchung von elf PV-FFA in Südengland wurden an drei Kontrollflächen höhere Fledermausaktivitäten erfasst, aber keine höheren Artenzahlen (Montag et al. 2016).

Durch die Einfriedung von PV-Anlagen kann es zu Unterbrechungen des Wegenetzes kommen. Für (große) Tiere kann die Auszäunung eine Unterbrechung von Wanderkorridoren im Sinne eines Biotopverbundes bedeuten (z. B. Wagegg und Trumpp 2015), wodurch schlimmstenfalls der genetische Austausch zwischen verschiedenen Populationen verhindert wird (Guerin 2017). Zusätzlich droht auch der Verlust der gesamten Fläche als Habitat (Groß- und Mittelsäuger). Je nach Ausgestaltung können Tiere unter den Zäunen durchschlüpfen, so dass die Flächen keine Barrierewirkung entfalten (vgl. Stoefer et al. 2013). Großflächige, nicht eingezäunte Wanderkorridore zwischen oder innerhalb von PV-FFA werden von Groß- und Mittelsäugern als Durchgang genutzt (Stoefer und Burg 2012) und können auf diese Weise zumindest die Vernetzung wiederherstellen.

4.1.3 Betriebsbedingte Auswirkungen

Als betriebsbedingte Auswirkungen sind für die Kollektoren Licht(-Reflexionen) und die Erwärmung der Module zu nennen. Bei den elektrischen Leitungen kann es zu elektromagnetischen Feldern und einer Erwärmung kommen (ARGE Monitoring PV-Anlagen 2007). Durch die regelmäßige Wartung und Instandhaltung, außerplanmäßige Reparaturen und den Austausch von Modulen sind Störungen durch den Menschen zu erwarten. Mahd bzw. Beweidung der Fläche als Pflegemaßnahme können ebenfalls Störungen darstellen, sind aber relativ flexibel anpassbar (UM BaWü 2019).

4.2 Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf Arten und Lebensgemeinschaften in Niedersachsen am Beispiel der Vögel

Um differenzierte Aussagen zu Auswirkungen auf die Fauna in Niedersachsen bis auf Artebene treffen zu können, wurde beispielhaft die Artengruppe der Vögel ausgewählt, mit einem Schwerpunkt auf Vogelarten des Offenlandes. Insbesondere der Lebensraum Acker wird sich durch einen vermehrten Einsatz von PV-FFA vorrangig verändern. Außerdem eignet sich die Artengruppe Vögel gut als Bioindikator, da sie sehr unterschiedliche Lebensraumansprüche haben und die Größe ihrer Bestände die Eignung einer Landschaft als Lebensraum, auch für andere Arten, widerspiegelt (BMUB 2015). Das Vorgehen zur Beurteilung der potenziellen Beeinträchtigung der Vogelarten des Offenlandes wird in Abb. 16 schematisch dargestellt und in Kap. 4.2.1 näher erläutert. Detaillierte Angaben zu den einzelnen Arten lassen sich den Tabellen (vgl. Abb. 16) entnehmen. Kapitel 4.2.2 behandelt anschließend die Auswirkungen von PV-FFA auf Durchzügler und Wintergäste.

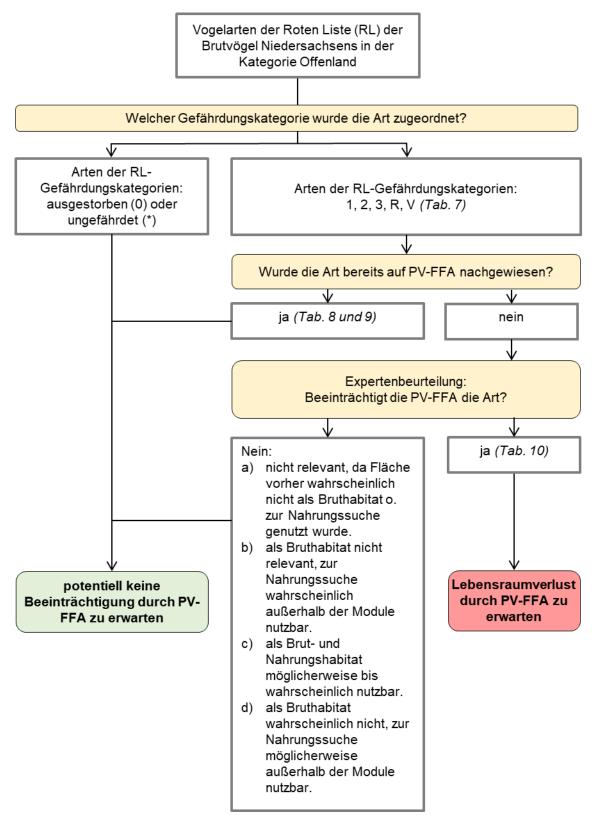


Abb. 16: Vorgehen zur Beurteilung der potenziellen Beeinträchtigung von Vogelarten des Offenlandes in Niedersachsen und Bremen.

4.2.1 Brutvögel

In der Roten Liste der Brutvögel Niedersachsens und Bremens sind 73 Arten der Kategorie O (= Offenland (genutzt), landwirtschaftliche Fläche) zugeordnet (Krüger und Nipkow 2015). Hiervon wurden vom Aussterben bedrohte Arten (Kategorie 1), stark gefährdete (Kategorie 2), gefährdete (Kategorie 3) und extrem seltene Arten (Kategorie R) sowie Arten der Vorwarnliste (Kategorie V) für die weitere Untersuchung ausgewählt (Tab. 8). Ausgestorbene (Kategorie 0) und ungefährdete Arten (*) wurden von der Betrachtung ausgeschlossen. Für die verbleibenden 45 in Niedersachsen gefährdeten Arten des Offenlandes wurde eine Abschätzung der potenziellen Auswirkungen von PV-FFA durchgeführt.

Tab. 8: In Niedersachsen gefährdete Brutvogelarten des genutzten Offenlandes und landwirtschaftlicher Flächen, für die eine potenzielle Beeinträchtigung durch PV-FFA näher untersucht wurde (nach Krüger und Nipkow 2015). Betrachtete Rote Liste-Gefährdungskategorien: 1 = vom Aussterben bedroht; 2 = stark gefährdet; 3 = gefährdet; R = extrem selten; V = Vorwarnliste.

Art	Gefähdungs- kategorien Rote Liste 2015	Hauptlebensrau mtyp	Schutz				
	Gefähdungs- kategorien Rote Liste 20	Hauptle mtyp	BNatSchG	VRL	CMS	вк	NSAB
Knäkente Anas querquedula	1	G, O	§§		Anh. II,	Anh. III	HP
Löffelente Anas [c.] clypeata	2	G, O	§		Anh. II,	Anh. III	HP
Wachtel Coturnix [c.] coturnix	V	0	§		Anh. II	Anh. III	Р
Rebhuhn Perdix [p.] perdix	2	0	§			Anh. III	HP
Graureiher Ardea [c.] cinerea	V	G, O, W	§		+	Anh. III	
Weißstorch Ciconia [c.] ciconia	3	0	§§	Anh. I	Anh. II,	Anh. II	Р
Wiesenweihe Circus pygargus	2	O, M	§§	Anh. I	Anh. II	Anh. II	Р
Rohrweihe <i>Circus</i> [a.] aeruginosus	V	M, O	§§	Anh. I	Anh. II	Anh. II	Р
Rotmilan <i>Milvus milvus</i>	2	W, O	§§	Anh. I	Anh. II	Anh. II	HP
Baumfalke Falco subbuteo	3	W, O	§§		Anh. II	Anh. II	Р
Turmfalke Falco [t.] tinnunculus	V	O, S	§§		Anh. II	Anh. II	
Wachtelkönig Crex crex	2	O, M	§§	Anh. I	Anh. II,	Anh. II	Р
Tüpfelsumpfhuhn Porzana porzana	2	M, O	§§	Anh. I	Anh. II,	Anh. II	HP
Kiebitz Vanellus vanellus	3	O, M	§§		Anh. II,	Anh. III	HP
Großer Brachvogel Numenius arquata	2	O, M, K	§§		Anh. II,	Anh. III	HP
Uferschnepfe Limosa limosa	2	O, K	§§		Anh. II,	Anh. III	HP
Bekassine <i>Gallinago</i> [g.] gallinago	1	O, M	§§		Anh. II,	Anh. III	HP

Rotschenkel Tringa totanus	2	O, K	§§		Anh. II,	Anh.	HP
Kampfläufer Philomachus	1	O, M, K	§§	Anh. I	Anh. II,	Anh.	HP
Turteltaube Streptopelia turtur	2	O, W	§§		+ Anh. II	Anh.	HP
Kuckuck Cuculus canorus	3	W, O	§			Anh.	Р
Steinkauz <i>Athene noctua</i>	3	O, S	§§			III Anh. II	Р
Neuntöter Lanius [cristatus] collurio	3	O, M	§	Anh. I		Anh. II	Р
Raubwürger Lanius [e.] excubitor	1	M, O	§§			Anh. II	HP
Haubenlerche Galerida cristata	1	O, S	§§			Anh. III	HP
Heidelerche Lullula arborea	V	O, T,	§§	Anh. I		Anh.	Р
Feldlerche Alauda arvensis	3	0	§			Anh.	Р
Rauchschwalbe Hirundo [r.] rustica	3	S, O	§			Anh. II	Р
Feldschwirl Locustella naevia	3	O, M, T	§		Anh. II	Anh. II	Р
Gelbspötter Hippolais [i.] icterina	٧	O, S,	§		Anh. II	Anh. II	
Gartengrasmücke Sylvia borin	V	O, S,	§		Anh. II	Anh. II	
Sperbergrasmücke Sylvia nisoria	1	0	§§	Anh. I	Anh. II	Anh. II	Р
Star Sturnus [v.] vulgaris	3	W, O,	§				
Braunkehlchen Saxicola [r.] rubetra	2	O, M	§			Anh. II	Р
Sprosser Luscinia [l.] luscinia	R	W, O	§			Anh. II	
Gartenrotschwanz Phoenicurus phoenicurus	V	O, S,	§			Anh. II	Р
Feldsperling Passer montanus	V	O, S	§			Anh. III	
Baumpieper Anthus trivialis	V	W, O	§			Anh. III	
Wiesenpieper Anthus pratensis	3	O, M, K	§			Anh. III	Р
Girlitz Serinus serinus	V	S, O	§			Anh. II	
Stieglitz Carduelis [c.] carduelis	V	O, S	§			Anh. II	
Bluthänfling Carduelis [c.] cannabina	3	O, S	§			Anh. II	
Grauammer Emberiza calandra	1	0	§§			Anh. III	HP
Goldammer Emberiza [c.] citrinella	V	0	§			Anh. III	
Ortolan Emberiza [h.] hortulana	2	0	§§	Anh. I		Anh.	Р

Rote Liste-Gefährdungskategorien: 1 = vom Aussterben bedroht; 2 = stark gefährdet; 3 = gefährdet; R = extrem selten; V = Vorwarnliste

Hauptlebensraumtypen: G Binnengewässer; K Küste; M Moore, Verlandungszonen; O Offenland (genutzt), landwirtschaftliche Flächen; S Siedlungen; T Trockenbiotope, Sonderstandorte; W Wälder

BNatSchG (Bundesnaturschutzgesetz): §= besonders geschützte Arten gemäß § 7 Abs. 2 Nr. 13 BNatSchG,

 $\S=$ streng geschützte Arten gemäß § 7 Abs. 2 Nr. 14 BNatSchG (jeweils in Verbindung mit § 44 BNatSchG);

VRL (EU-Vogelschutzrichtlinie): Anh. I= besonders zu schützende Vogelart oder -- unterart nach Anhang I;

CMS (Bonner Konvention): Anh. II= wandernde Art, für die Abkommen zu schließen ist nach Anhang II,

+= Wasservogelart, auf die das Regionalabkommen AEWA anwendbar ist;

BK (Berner Konvention): Anh. II= geschützte Vogelart nach Anhang II, Anh. III= geschützte Vogelart nach Anhang III; NSAB (Niedersächsische Strategie zum Arten- und Biotopschutz zur Umsetzung des Übereinkommens zur biologischen Vielfalt): HP= Brutvogel mit höchster Priorität für die Umsetzung von Schutzmaßnahmen, P= Brutvogel mit Priorität für die

Umsetzung von Schutzmaßnahmen)

Wichtige Quellen stellten hierbei Tröltzsch und Neuling (2013), Neuling (2009), Herden et al. (2009), Stoefer et al. (2013), Stoefer et al. (2014), Hübner et al. (2014) und Lieder und Lumpe (2012) dar. Artspezifische Angaben zu den Nutzungen von PV-FFA wie z. B. Brut, wahrscheinliche Brut, Nahrungssuche oder Ansitz wurden so genau wie möglich zusammengetragen. Aufgrund verschiedener Erfassungsgenauigkeiten ergaben sich Unterschiede in den Angaben einzelner Quellen. Ziel war es, herauszufinden, ob eine Art PV-FFA zur Brut oder zumindest zur Nahrungssuche nutzt. Hierbei ist davon auszugehen, dass eine Art, die eine PV-FFA bereits genutzt hat, auch andere Anlagen nutzen würde, sofern diese unter Gesichtspunkten des Naturschutzes konzipiert und extensiv gepflegt werden. Gab es Angaben aus mehreren Quellen für eine Art, so wurde die stärkste Nutzung als Gesamtbewertung für die Art aufgenommen (Nutzung als Bruthabitat ist stärker zu werten als die Nutzung als Nahrungshabitat). Insgesamt konnte für 28 der in Niedersachsen gefährdeten Arten des Offenlandes (62,2%) eine Nutzung der PV-FFA belegt werden. 16 dieser Arten (57 %) nutzten die Anlage als Bruthabitat (vgl. Abb. 16, Tab. 9).

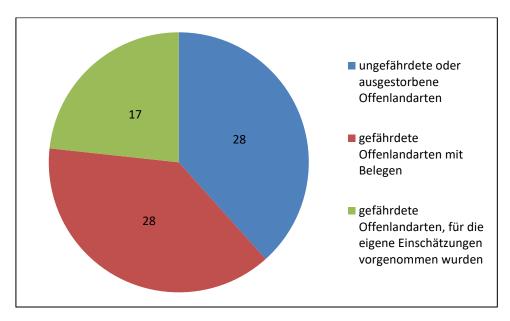


Abb. 17: Zuordnung der niedersächsischen Offenlandarten (n=73) zu den untersuchten Gruppen.

Tab. 9: In Niedersachsen gefährdete Vogelarten des Offenlandes, die PV-FFA nachweislich als Bruthabitat nutzen. Differenzierte Quellenangaben siehe Anhang.

Art	Gefährdungskategorien Rote Liste 2015
Wachtel Coturnix [c.] coturnix	V
Rebhuhn Perdix [p.] perdix	2
Turteltaube Streptopelia turtur	2
Neuntöter Lanius [cristatus] collurio	3
Raubwürger Lanius [e.] excubitor	1
Heidelerche Lullula arborea	V
Feldlerche Alauda arvensis	3
Gelbspötter Hippolais [i.] icterina	V
Gartengrasmücke Sylvia borin	V
Sperbergrasmücke Sylvia nisoria	1
Braunkehlchen Saxicola [r.] rubetra	2
Feldsperling Passer montanus	V
Baumpieper Anthus trivialis	V
Bluthänfling Carduelis [c.] cannabina	3
Grauammer Emberiza calandra	1
Goldammer Emberiza [c.] citrinella	V
1 Vom Aussterben bedroht; 2 Stark gefährdet; 3 G	efährdet; V Vorwarnliste

Für Graureiher (*Ardea [c.] cinerea*), Rohrweihe (*Circus [a.] aeruginosus*), Rotmilan (*Milvus milvus*), Baumfalke (*Falco subbuteo*), Turmfalke (*Falco [t.] tinnunculus*), Rauchschwalbe (*Hirundo [r.] rustica*) und Star (*Sturnus [v.] vulgaris*) wurde die Nutzung als Nahrungshabitat nachgewiesen (vgl. Tab. 10). Wobei Rauchschwalben bereits in Nisthilfen brütend in PV-FFA kartiert wurden (Tröltzsch und Neuling 2013). Von der Installation geeigneter Nisthilfen könnten somit auch Turmfalke und Star profitieren. Für die Arten Kiebitz (*Vanellus vanellus*), Bekassine (*Gallinago [g.] gallinago*), Wiesenpieper (*Anthus pratensis*), Girlitz (*Serinus serinus*) und Stieglitz (*Carduelis [c.] carduelis*) ist sicherlich die Größe und Ausgestaltung der (offenen) Randbereiche um die Solarmodule maßgeblich, ob diese Arten PV-FFA als Bruthabitat nutzen können.

Für die verbleibenden 17 Arten wurde eine eigene Einschätzung der Nutzungspotenziale hinsichtlich des Brut- oder Nahrungshabitats durchgeführt. Dies erfolgte auf Grundlage der Angaben zu Lebensraum und Brutbiologie in Südbeck et al. (2005). Da PV-FFA unterschiedliche räumliche Qualitäten (Modulflächen, Randbereiche) für Vogelarten aufweisen, wurde bei der eigenen Einschätzung in eine Nutzung der mit Solarmodulen bestandenen Flächen und der angrenzenden, offenen Bereiche der PV-FFA unterschieden (Tab. 11).

Knäkente (*Anas querquedula*), Löffelente (*Anas [c.] clypeata*) und Tüpfelsumpfhuhn (*Porzana porzana*) nutzen Ackerflächen generell nicht als Lebensraum. Trotzdem könnte eine Nutzung von PV-FFA durchaus möglich sein, sollten auf der Fläche größere Gewässer angelegt werden oder sollte die direkte Umgebung bereits ein Vorkommen dieser Arten begünstigen.

Tab. 10: In Niedersachsen gefährdete Vogelarten des Offenlandes, die PV-FFA nachweislich zur Nahrungssuche nutzen. Differenzierte Quellenangaben siehe Anhang.

Art	Rote Liste 2015		
Graureiher Ardea [c.] cinerea	V		
Rohrweihe Circus [a.] aeruginosus	V		
Rotmilan <i>Milvus milvus</i>	2		
Baumfalke Falco subbuteo	3		
Turmfalke Falco [t.] tinnunculus	V		
Kiebitz Vanellus vanellus	3		
Bekassine Gallinago [g.] gallinago	1		
Rauchschwalbe Hirundo [r.] rustica	3		
Star Sturnus [v.] vulgaris	3		
Wiesenpieper Anthus pratensis	3		
Girlitz Serinus serinus	V		
Stieglitz Carduelis [c.] carduelis	V		
1 Vom Aussterben bedroht; 2 Stark gefährdet; 3 Gefährdet; V Vorwarnliste			

Für Weißstorch (*Ciconia* [c.] ciconia), Wiesenweihe (*Circus pygargus*) und Steinkauz (*Athene noctua*) wird eine Nutzung zur Nahrungssuche in den Randbereichen als wahrscheinlich bis möglich erachtet. Hierbei sind die Größe und Form der nicht überbauten Fläche entscheidend. Verwiesen sei auf die Nutzung von PV-FFA als Nahrungshabitat von Rohrweihe (*Circus* [a.] aeruginosus) und Rotmilan (*Milvus milvus*) (Stoefer et al. 2013; Stoefer et al. 2014; Lieder und Lumpe 2012; Knipfer und Raab 2013), die die Einschätzung einer potenziellen Nutzung unterstützen.

Für Wachtelkönig (*Crex crex*), Kuckuck (*Cuculus canorus*), Haubenlerche (*Galerida cristata*), Feldschwirl (*Locustella naevia*), Sprosser (*Luscinia [l.] luscinia*), Gartenrotschwanz (*Phoenicurus phoenicurus*) und Ortholan (*Emberiza [h.] hortulana*) ist die Nutzung als Nahrungs- und als Bruthabitat potenziell möglich. Für diese Arten sind das Umfeld der PV-FFA und deren Ausstattung entscheidend für ein Vorkommen auf einer Anlage. Ob diese Arten PV-FFA wirklich als Nahrungs- und Bruthabitat nutzen können bzw. unter welchen Bedingungen dies möglich ist, ist im Rahmen weiterer Untersuchungen zu klären.

Der Große Brachvogel (*Numenius arquata*), Uferschnepfe (*Limosa limosa*), Rotschenkel (*Tringa totanus*) und Kampfläufer (*Philomachus pugnax*) werden PV-FFA nicht als Bruthabitate und nur möglicherweise als Nahrungshabitate nutzen (Abb. 18). Diese Arten benötigen große, offene Flächen zur Nahrungssuche und Brut. Für sie sind daher Verluste von Brut- und Nahrungshabitaten durch PV-FFA möglich, die sich aufgrund der Verbreitungsgebiete vornehmlich auf den Norden Niedersachsens, hier speziell die Küstengebiete konzentrieren würden (Krüger et al. 2014). Positiv ist der Nachweis einer Bekassine (*Gallinago [g.] gallinago*) als Nahrungsgast auf einer PV-FFA in Nord Bayern zu werten (Hübner et al. 2014). Dies zeigt, dass die Nutzung von PV-FFA durch Limikolen nicht ausgeschlossen ist.



Abb. 18: PV-FFA-sensible Arten: Großer Brachvogel (*Numenius arquata*), Uferschnepfe (*Limosa limosa*), Rotschenkel (*Tringa totanus*) und Kampfläufer (*Philomachus pugnax*). Fotos: Salcher, J. und Nissen, C.

Tab. 11: Einschätzung der potenziellen Nutzung einer PV-FFA als Nahrungs- und/oder Bruthabitat durch die in Niedersachsen gefährdeten Vogelarten des Offenlandes.

Art	Rote Liste 2015	Lebensraum (Südbeck et al. 2005)	Brutbiologie (Südbeck et al. 2005)	Eigene Einschätzungen anhand Lebensraum und Brutbiologie (Südbeck et al 2005)
Knäkente Anas querquedula	1	eutrophe, flache Gewässer	Bodenbrüter	Nicht relevant, da Fläche vorher wahrscheinlich nicht als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche genutzt wurde.
Löffelente Anas [c.] clypeata	2	eutrophe, flache Gewässer	Bodenbrüter	Nicht relevant, da Fläche vorher wahrscheinlich nicht als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche genutzt wurde.

Weißstorch Ciconia [c.] ciconia	3	Siedlungsbewohner mit Nahrungshabitaten in Niederungslandschaften	Freibrüter, Nest hoch auf Gebäuden o.ä.	Als Bruthabitat nicht relevant, zur Nahrungssuche wahrscheinlich außerhalb der Module nutzbar.
Wiesenweihe Circus pygargus	2	großräumige Niederungslandschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat nicht relevant, zur Nahrungssuche möglicherweise außerhalb der Module nutzbar.
Wachtelkönig Crex crex	2	großräumige, offene bis halboffene Niederungslandschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat und zur Nahrungssuche wahrscheinlich nutzbar.
Tüpfelsumpfhuhn Porzana porzana	2	Verlandungszonen	Bodenbrüter	Nicht relevant, da Fläche vorher wahrscheinlich nicht als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche genutzt wurde.
Großer Brachvogel Numenius arquata	2	weitgehend offene Niederungslandschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat wahrscheinlich nicht, zur Nahrungssuche möglicherweise außerhalb der Module nutzbar.
Uferschnepfe Limosa limosa	2	weitgehend offene Niederungslandschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche wahrscheinlich nicht nutzbar.
Rotschenkel Tringa totanus	2	Küstengebiete an Nord- und Ostsee	Bodenbrüter	Als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche wahrscheinlich nicht nutzbar.
Kampfläufer Philomachus pugnax	1	großräumige, offene bis halboffene Niederungslandschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche wahrscheinlich nicht nutzbar.
Kuckuck Cuculus canorus	3	verschieden Lebensraumtypen	Brutschmarotzer	Als Bruthabitat und zur Nahrungssuche wahrscheinlich nutzbar.
Steinkauz Athene noctua	3	Kulturfolger	Höhlen- bzw. Halbhöhlenbrüter	Als Bruthabitat nicht relevant, zur Nahrungssuche wahrscheinlich außerhalb der Module nutzbar.

Haubenlerche Galerida cristata	1	Trockene vegetationsarme Standorte	Bodenbrüter	Als Bruthabitat möglicherweise außerhalb der Module, zur Nahrungssuche wahrscheinlich nutzbar.
Feldschwirl Locustella naevia	3	Offenes bis halboffenes Gelände	Freibrüter	Als Bruthabitat und zur Nahrungssuche möglicherweise außerhalb der Module nutzbar.
Sprosser Luscinia [l.] luscinia	R	Gebüschzonen	Freibrüter	Als Bruthabitat und zur Nahrungssuche möglicherweise nutzbar.
Gartenrotschwanz Phoenicurus phoenicurus	V	Lichte aufgelockerte Altholzbestände	Halbhöhlen- auch Freibrüter	Als Bruthabitat möglicherweise, zur Nahrungssuche wahrscheinlich nutzbar.
Ortolan <i>Emberiza</i> [h.] hortulana	2	offene, aber strukturreiche Landschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat wahrscheinlich außerhalb der Module, zur Nahrungssuche wahrscheinlich nutzbar.

Insgesamt konnten für 45 in Niedersachsen gefährdete Vogelarten des Offenlands Belege oder Einschätzungen zur Nutzung von PV-FFA vorgenommen werden. Für 41 Arten konnte die Nutzung belegt bzw. eine potenzielle Nutzung angenommen werden. Profiteure von PV-FFA sind Nischenbrüter wie Bachstelze (*Motacilla alba*) und Hausrotschwanz (*Phoenicurus ochruros*) (z. B. Tröltzsch und Neuling 2013). Die Veränderung von Brutdichten ist in dieser Auswertung nicht betrachtet worden. Hierfür ist der Ausgangszustand vor dem Bau der PV-FFA entscheidend. Für die Feldlerche wurden bspw. sowohl höhere als auch geringere Brutdichten auf PV-FFA im Vergleich zu vorherigen Kartierungen bzw. umliegenden Flächen dokumentiert (Montag et al. 2016; Tröltzsch und Neuling 2013). Lediglich für vier der untersuchten Arten scheint eine Nutzung von PV-FFA schwierig.

Die Umwandlung einer vorherigen intensiven Acker- oder Grünlandnutzung in eine PV-FFA kann eine deutliche Aufwertung für verschiedene Vogelarten bedeuten, falls diese unter Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte geplant und später extensiv genutzt bzw. gepflegt wird. PV-FFA können daher einen Beitrag zur Stabilisierung der Vogelartenvielfalt leisten (Raab 2015).

4.2.2 Durchzügler und Wintergäste

Neben der Nutzung als Bruthabitat im Sommer, könnten PV-FFA von Vögeln in Herbst und Frühling im Zug, als auch im Winter als Nahrungshabitat genutzt werden. Generell ist davon auszugehen, dass Arten, die PV-FFA in den Sommermonaten nutzen, diese auch in der Zugzeit bzw. in den Wintermonaten nicht meiden. Untersuchungen hierzu gibt es nur wenige. Als wertgebende Arten konnten Braunkehlchen (*Saxicola rubetra*), Wiesenpieper (*Anthus pratensis*)und Feldlerche (*Alauda arvensis*) als Durchzügler auf einer PV-FFA beobachtet werden (Herden et al. 2009). Feldsperlinge und Goldammern nutzten die Flächen als Nahrungsgäste (Herden et al. 2009). Des Weiteren konnten bei

einer Zug- und Rastvogelkartierung u.a. Raubwürger (*Lanius excubitor*), Stieglitz (*Carduelis carduelis*), Star (*Sturnus vulgaris*), Goldammer (*Emberiza citrinella*) und Grauammer (*Emberiza calandra*) auf einer PV-FFA festgestellt werden (Stoefer et al. 2013). Nordische Gänse und Kiebitze (*Vanellus vanellus*) wurden nur im Überflug beobachtet (Stoefer et al. 2013).

Nordische Gastvögel sind aufgrund von Anhang I bzw. Art. 4 Abs. 2 der Vogelschutzrichtlinie geschützte Arten in Niedersachsen. Das Land Niedersachsen ist daher dazu verpflichtet, die Lebensräume dieser geschützten Arten dauerhaft zu erhalten. Befürchtet wird, dass nordische Gänse und Schwäne PV-FFA meiden und diese Flächen somit als Nahrungshabitat verloren gehen. Diese Meidung könnte sich auf direkt angrenzende Flächen ausweiten, so dass überwinternde nordische Gänse erhebliche Schäden in der Landwirtschaft im Norden Niedersachsens verursachen könnten (Nds. RL noGa-Acker). Bestätigen sich diese Vermutungen, könnte sich eine Verschärfung der Fraß- und Trittschäden auf weiter entfernt gelegenen Flächen verschärfen und wichtiger Lebensraum dieser Arten verloren gehen.

Die Literatur wurde vor diesem Hintergrund auf Angaben zu nordischen Gastvögeln gesichtet. Es konnten keine Belege gefunden werden, die eine Nutzung von PV-FFA durch nordische Gänse und Schwäne nahelegen. Herden et al. (2009) beobachteten zwei rastende Graugänse (Anser anser) auf einer Wiese direkt neben einer PV-FFA in einer Entfernung von 30-40 m. Diese Beobachtung legt nahe, dass Graugänse PV-FFA nicht weiträumig meiden. Des Weiteren wurde auch ein Kranich (Grus grus) auf einer Fläche direkt neben einer PV-FFA nachgewiesen (Stoefer et al. 2013). In den USA gibt es einen Nachweis für eine Kanadagans (Branta canadensis) auf einem Flugfeld, wobei für das angrenzende Solarfeld kein Nachweis erbracht wurde (DeVault et al. 2014). Mehr Nachweise dieser Arten konnten durch die Literaturrecherche nicht ermittelt werden. Möglicherweise liegen zu den nordischen Rastvögeln bisher keine Erfassungen vor, da in den Küstenregionen Deutschlands kaum PV-FFA installiert wurden (vgl. Niemann et al. 2017). Um das Meidungsverhalten nordischer Rastvögel untersuchen zu können, müssten Zug- und Rastvogelkartierungen auf PV-Anlagen durchgeführt werden, die bestenfalls innerhalb Schwerpunkt-Vorkommen von nordischen Gastvögeln (vgl. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU)) oder aber in den Küstengebieten Niedersachsens liegen. Bis die Meidung von PV-FFA und Meidungsdistanzen geklärt sind, sollte von erheblichen Ausbauten von PV-FFA in den Küstengebieten Abstand genommen werden. Derzeit ist mit einer kleinflächigen Meidung der PV-FFA und mit einem Ausweichen in nahegelegene, geeignete Rastflächen zu rechnen.

Tab. 12: Geschützte nordische Gastvögel in Niedersachsen nach Anhang 1 oder Art. 4 Abs. 2 der EU-Vogelschutzrichtlinie

Art	Rote Liste 2015
Höckerschwan Cygnus olor	*
Singschwan Cygnus cygnus	
Zwergschwan Cygnus columbianus	
Weißwangengans Branta [canadensis] leucopsis	*
Saatgans Anser [f.] fabalis	
Graugans Anser anser	*
Blässgans Anser albifrons	
Zwerggans Anser erythropus	
Kurzschnabelgans Anser brachyrhynchus	
Ringelgans Branta bernicla	

Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf die Biodiversität und die menschliche Gesundheit

Pfeifente Anas [p.] penelope	R
R Extrem selten; * Ungefährdet	

4.3 Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf Boden und Wasserhaushalt

Neben den Auswirkungen auf die Biodiversität sowie das Landschaftsbild können PV-FFA auch den Boden und das Grundwasser beeinflussen. Wie sich vor allem große Anlagen auf das Sickerverhalten, den Bodenwasserhaushalt und damit die Grundwasserneubildung auswirken wurde in Deutschland bislang kaum untersucht. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse internationaler Untersuchungen ist aufgrund der mitunter sehr verschiedenen Standortverhältnisse nur bedingt möglich. Nichtsdestotrotz werden in diesem Kapitel der Vollständigkeit halber auch Ergebnisse internationaler Studien vorgestellt. An dieser Stelle soll auf das laufende Projekt der HTW Dresden MatEnUm-2 verwiesen werden, in dem Untersuchungen zum Bodenwasserhaushalt unter einer 600 kWp Agro-PV-Pilotanlage durchgeführt werden (HTW Dresden 2018). Dessen Ergebnisse können erste belastbare Hinweise auf die Erheblichkeit der Bodenauswirkungen von PV-FFA geben.

Generell bedeutet eine PV-FFA für den Boden und den Wasserhaushalt eine deutliche Entlastung gegenüber einer intensiven landwirtschaftlichen Nutzung. Dies wirkt sich sowohl auf die Bodenfunktionen als auch auf die Grundwasserqualität aus. Während 30 bis 40 Jahren Laufzeit der Anlage erfolgt keine Bodenbearbeitung, Düngung oder Ausbringung von Pestiziden. Das Bodenleben kann sich über einen langen Zeitraum regenerieren und die Belastung des Grundwassers reduziert sich. Auch hinsichtlich des Schutzes von Bächen vor Einträgen aus den landwirtschaftlichen Nutzungen können sich Vorteile ergeben, so dass die Freiflächenanlagen zum Erreichen der Ziele der Wasserrahmenrichtlinie beitragen (AIGNER et al. o. J.).

4.3.1 Baubedingte Auswirkungen

In den meisten Fällen beeinträchtigt der Bau einer PV-FFA die Bodenfunktionen (natürliche Bodenfruchtbarkeit, Ausgleichskörper im Wasserhaushalt, Filter und Puffer für Schadstoffe, Sonderstandort für naturnahe Vegetation) nur in geringem Maße (UM BaWü 2019, S. 64). Die Auswirkungen entstehen durch die Baustelleneinrichtung und den Baubetrieb (Herden et al. 2009):

Baustelleneinrichtung

- Flächenbelegung
- Bodenverdichtung
- Bodenabtrag

Baubetrieb

- Stoffliche Emissionen
- Schallemissionen
- Licht durch Fahrzeuge und Scheinwerfer
- Erschütterung

Zu den Auswirkungen während Einrichtung und Betrieb der Baustelle gehören die Gründung für Modultische und Trafostationen sowie die Verlegung von Erdkabeln. Bei den Gründungen der Modultische können "Wasserwegsamkeiten" zwischen der Oberfläche der Gründungselemente und dem Untergrund" den Eintrag von während der Bauphase verwendeten Schadstoffen begünstigen (LfU 2013). Ähnlich verhält es sich mit dem Einbau der Erdkabel, bei dem das eingebaute Sandbett sich negativ auf das Rückhaltevermögen des Bodens auswirken kann und auch bei den Trafostationen sollte darauf geachtet werden, keine wassergefährdenden Öle als Isolier- und Kühlmedium zu verwenden (ebd.). Die Lockerung, Verdichtung und Versiegelung des Bodens kann sich auf den Wasserabfluss auswirken und es besteht das Risiko, dass grundwasserschützende Deckschichten gelockert oder geschädigt werden (LfU 2013). Diese Auswirkungen sind jedoch nicht spezifisch für PV-FFA und entstehen bei vielen Vorhabentypen (Herden et al. 2009).

4.3.2 Anlagebedingte Auswirkungen

Durch die Überschirmung und Tropfleitung der Modulfläche ändert sich unter PV-FFA die Versickerung von Niederschlägen (Herden und Martin 2005; LfU 2013). Abhängig von der Bauweise der Modultische kommt es zu ungleicher Verteilung des Wassers unter und neben den Modulen (Elamri et al. 2018a; Jahanfar et al. 2019). Dadurch unterliegen die Randbereiche stärkeren Regeneinflüssen als normal, was bei starken Regenereignissen zu Bodenerosion führen kann, vor allem bei vegetationslosem Boden (ebd.). In Bezug auf die Wasserverteilung im Boden führt PV-FFA vor allem in den oberen Bodenschichten zu deutlichen Unterschieden, mit trocken bleibendem Boden unter den Modulen und feuchtem Boden im Randbereich und zwischen den Modulen. In den tieferen Bodenschichten gleicht sich die Wasserverteilung allmählich an (Hartmann 2010). Dies ist auch auf sehr unregelmäßige Lichtund Schattenverhältnisse sowie Windverhältnisse zurückzuführen (ebd.). Abb. 19 zeigt die Auswirkungen unterschiedlicher Modulausrichtungen auf das Ablaufverhalten bei Regen.

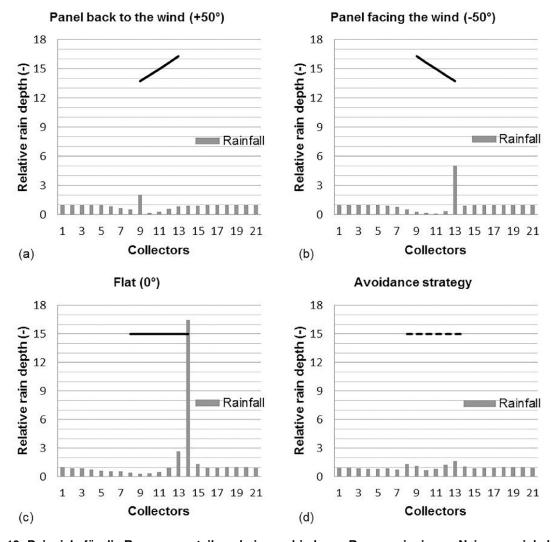


Abb. 19: Beispiele für die Regenumverteilung bei verschiedenen Regenereignissen, Neigungswinkel und Betriebsstrategien der Sonnenkollektoren (Elamri et al. 2018b)

Ein höherer Abstand der Module zum Boden wirkt einer unregelmäßigen Verteilung der Niederschläge entgegen und führt zu mehr pflanzenverfügbarem Wasser unter den Modulen. Aber auch Anpassungen in der Modulausrichtung zur Hauptwindrichtung sowie Variationen der Neigungswinkel oder bewegliche Modultische können Strategien zur Angleichung der Niederschlagsverteilung darstellen (Elamri et al. 2018b).

Die Beschattung des Bodens durch die Module wirkt sich ebenfalls auf die Evapotranspiration (i.e. die Gesamtverdunstung der Bodenoberfläche, bestehend aus Evaporation und Transpiration) aus (vgl. Abb. 20). Generell kann von einer höheren Evapotranspiration der nassen Randbereiche der Module und einer verminderten Evapotranspiration unter den Modulen ausgegangen werden (Jahanfar et al. 2019). Insgesamt führt dies zu verminderter Evapotranspiration der gesamten Anlagenfläche (Amaducci et al. 2018; Marrou et al. 2013a; Pisinaras et al. 2014).

Auswirkungen auf die Wasserqualität durch gelöste Schadstoffe aus den verzinkten Modulhalterungen und -tragekonstruktionen (Acar und Dincer 2017) sind möglich, da ausgewaschene Zink-Ionen ins Grundwasser gelangen können. Im Zuge der Literaturrecherche wurden keine aktuellen Veröffentlichungen zu diesem Thema gefunden. Von einer erheblichen Beeinträchtigung wird i.d.R. nicht ausgegangen (ARGE Monitoring PV-Anlagen 2007), es sei denn die im Boden verankerten Stahlprofile reichen bis in die gesättigte Grundwasserzone oder den Grundwasserschwankungsbereich. Dann ist ein Stoffeintrag ins Grundwasser und die Gefährdung der natürlichen Organismen nicht auszuschließen (LfU 2013) und es sollte auf andere Baumaterialien oder Gründungsverfahren zurückgegriffen werden.

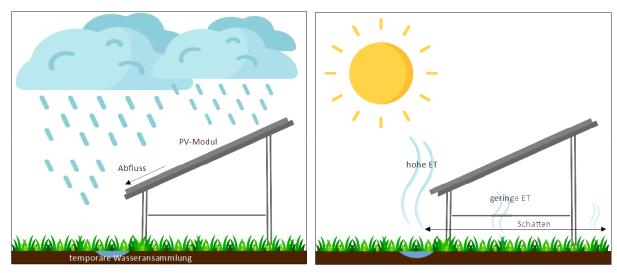


Abb. 20: Schematische Darstellung des Abflussverhaltens (links) und der Evapotranspiration (rechts) verändert nach Jahanfar et al. (2019).

Die Auswirkungen durch die Versiegelung der Fläche ist abhängig von der Wahl der Fundamente bzw. der Art der Aufständerung der Module sowie der Nebengebäude (UM BaWü 2019). Der Verzicht auf Schwerkraftfundamente (z. B. Betonrund- oder Streifenfundamente) und stattdessen der Einsatz von Pfahlgründungen wie z. B. durch die Verwendung von Erddübeln kann die Versiegelung auf bis zu 1% der Fläche minimieren (Peschel et al. 2019).

4.3.3 Betriebsbedingte Auswirkungen

Betriebsbedingte Auswirkungen auf den Boden und den Wasserhaushalt sind als nicht erheblich einzustufen. Der Verzicht von Herbiziden und Düngung bei der Flächenpflege ermöglicht eine naturschutzgerechte Entwicklung der Vegetation (UM BaWü 2019). Eine nordamerikanische Studie führt die Gefahr der Bildung von Hitzeinseln durch das Aufheizen der Fläche an (Barron-Gafford et al. 2016). Nach Ansicht der Autoren ist dieser Effekt in Deutschland jedoch zu vernachlässigen, zumal die Studie in semiariden Wüstenregionen Arizonas durchgeführt wurde. Negative Auswirkungen über stoffliche Emissionen durch das Waschen der Module konnten bislang nicht nachgewiesen werden (Herden et al. 2009).

4.4 Auswirkungen von PV-Freiflächenanlagen auf das Landschaftsbild

PV-FFA haben einen hohen Einfluss auf das Landschaftserleben und damit auch auf die Akzeptanz dieser Technologie, selbst wenn die Einstellung des Betrachters gegenüber Solarenergie grundsätzlich positiv ist (Hunziker et al. 2014). Dies wird von der Tatsache unterstrichen, dass geplante PV-FFA-Vorhaben oft an Ablehnungsgründen von landes- und regionalplanerischer Seite scheitern, die auf das Landschaftsbild zurückzuführen sind (ARGE Monitoring PV-Anlagen 2007). Dabei sind die Großflächigkeit und der technische Charakter der Anlagen sowie die jeweiligen Standortgegebenheiten für den Grad der Beeinträchtigung entscheidend (Herden et al. 2009; Knoll 2011; Scognamiglio 2016; Schmidt et al. 2018b).

4.4.1 Baubedingte Auswirkungen

Durch den Bau der Anlage bedingte Auswirkungen auf das Landschaftsbild sind im Vergleich zu ähnlich großflächigen Bauvorhaben gering. Der Baustellenbetrieb sowie Bau- und Transportfahrzeuge führen zu Lärm, Erschütterungen und stofflichen Emissionen (ARGE Monitoring PV-Anlagen 2007) im näheren Umkreis. Von einer substanziellen, bleibenden Schädigung durch baubedingte Belastungsfaktoren ist jedoch nicht auszugehen.

4.4.2 Anlagebedingte Auswirkungen

Grundsätzlich zeigt sich der Trend, dass die Erholungssuchenden weniger Gefallen an der Photovoltaikanlage finden, je mehr sie davon sehen und wahrnehmen (Sánchez-Pantoja et al. 2018). Anders als bei Windenergieanlagen, die durch ihre vertikale Struktur und sich bewegende Rotorblätter ins Auge stechen, fallen PV-FFA durch **ihren weiträumigen Flächenanspruch** auf. Sie können in Abhängigkeit der Entfernung des Betrachters zur Anlage einen großen Teil des Blickfeldes einnehmen (Schuler et al. 2017) und im Nahbereich sehr dominant wirken (Demuth et al. 2019). Die Größe der Anlage kann zu einem Maßstabsverlust beim Betrachter führen, da sie die natürlichen Größenverhältnisse der Landschaftselemente durch ihre Dimensionierung sprengt (Demuth 2000).

Hierbei ist auch die **Anlagenhöhe** entscheidend; die visuelle Auffälligkeit ist besonders hoch, wenn die Anlagensilhouette die Horizontlinie schneidet und zu einer Horizontüberhöhung führt (Herden et al. 2009). Objekte in der Horizontlinie fallen deutlich mehr auf, da diese Linie bei der Wahrnehmung der Umgebung einen wichtigen Orientierungspunkt darstellt (Knoll 2011).

Aus diesem Grund ist auch die **Exposition der Anlage** sehr relevant. So können Hang- und Kuppenlagen zu Sichtbarkeiten von bis zu 4000 m führen (Herden et al. 2009; Knoll 2011), aber auch in Tallagen ist die Sichtbarkeit nicht auszuschließen. Abb. 21 zeigt, dass der Sichtraum auf Anlagen auf Kuppen (a, gleiches gilt für Ebenen) durch geeignete Abpflanzungen reduzierbar ist. In Tallagen (b) beschränkt sich der Sichtraum auf die Größe des Talraums und strahlt nicht über die nächstgelegenen Höhenzüge hinaus. In Hanglagen (c) ist eine vollständige Sichtverschattung durch Abpflanzung nicht mehr möglich. Abhängig vom Relief der Umgebung ist die Anlage auch über mehrere Höhenzüge sichtbar.

4.4.3 Betriebsbedingte Auswirkungen

Der größte Einfluss auf das Landschaftsbild entsteht durch den Betrieb der Anlage. Betriebsbedingte Auswirkungen durch aktive Ausleuchtung in Bereichen des Betriebsgeländes, z. B. an Gebäuden sind möglich (Herden et al. 2009). Nachgeführte Anlagen verursachen durch die Ausrichtungsbewegungen zur Sonne hin Geräusche, die nach Herstellerangaben, einem Schalldruckpegel von 30 dB entsprechen (ebd.).

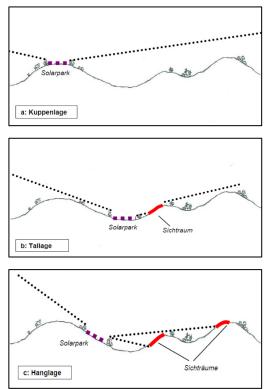


Abb. 21: Auswirkungen von Relief und Sichtverschattungen auf den Sichtraum (Schema), nach (Herden et al. 2009)

Technische Überprägung von Landschaften kann zur Veränderung der qualitativen Ausprägung (Vielfalt, Eigenart, Schönheit) von Landschaftsbildräumen führen (ARGE Monitoring PV-Anlagen 2007). PV-FFA sind als landschaftsfremde Objekte immer eine Beeinträchtigung des Landschaftsbildes (Herden et al. 2009). Landschaftsfremd sind sie durch ihre technische Erscheinung, die sich in der Regel von der umgebenden Landschaft unterscheidet. Scognamiglio (2016) nennt 3 Faktoren, weshalb PV-FFA-Anlagen in der Landschaft auffallen:

- Die durch die Anlage belegte Fläche ist im Verhältnis zu der von anderen Landschaftselementen belegten Fläche wesentlich größer.
- Die starre reihenparallele Ausrichtung der Module zur Sonne stellt ein Muster mit einer vorherrschenden Richtung dar, welches im Bezug zu anderen geometrischen Strukturen der Landschaft auffällig sein kann.
- Die Dichte der PV-Module kann im Vergleich zum Landschaftsmuster zu hoch sein und einen stark künstlichen Effekt bewirken, vor allem in natürlichen oder landwirtschaftlich geprägten Landschaften.

Hinzu kommt, dass die Einzäunung der Anlage einen klaren Schnitt zwischen Landschaft und Anlage darstellt (Schmidt et al. 2018a). Auch wenn technische Anlagen aus landschaftsfremden Materialien bestehen, werden sie als negativ wahrgenommen (Peters et al. 2009). Bei PV-FFA spielen hier vor allem die Farbe der Module, Aufständerungen und der Modulrahmen eine Rolle. Auch mögliche

Lichtreflexe (Blendwirkung) und Spiegelungen können als störend empfunden werden. Dabei sind die Wetterlage, das Material und die Lage der Anlage entscheidend. Vor allem morgens und abends kann der niedrige Einfallswinkel der Sonne (<40°) die Blendwirkung von PV-FFA zu einem Konfliktpunkt machen (vgl. dazu auch die Urteile zum Thema Blendwirkung bei Knoll (2011)). Bei der Modellierung der Einstrahlung einer Anlage in Italien (Chiabrando et al. 2009) zeigte sich, dass es im Jahresverlauf an 2 Tagen im Jahr zu einer Blendwirkung der gegenüberliegenden Hausfassaden kam (21.02 und 21.03.). Diese dauerte jeweils von 8:30 Uhr bis 8:45 Uhr bzw. 8:15 Uhr bis 8:30 Uhr. Die Blendwirkung war jedoch relativ gering, da die Solarstrahlung um diese Uhrzeit relativ schwach war und die Sonneneinstrahlung ebenfalls aus dieser Richtung kam.

Sichtbarkeit und Landschaftsintegration sind ebenfalls zwei wichtige Aspekte im Hinblick auf die Akzeptanz von Photovoltaik in der Landschaft. Generell ist ein hoher Integrationsgrad empfehlenswert. Allerdings hat sich gezeigt, dass Experten dazu neigen gut integrierte Designs zu bevorzugen, selbst wenn sie sichtbar sind, während Laien bzw. weniger erfahrene Personen eher versteckte Lösungen bevorzugen (Naspetti et al. 2016).

Ein weiterer standortbedingter Wirkfaktor ist die Vorbelastung der Landschaft. Unbeeinträchtigte, naturnahe Landschaften reagieren sensibler auf PV-FFA-Anlagen als durch anthropogene Vorbelastungen beeinträchtigte Landschaften (Hunziker et al. 2014; Knoll 2011). Hinzu kommt, dass durch den Bau einer Anlage in "unberührter Landschaft" die Hemmschwelle sinkt, dort weitere technogene Elemente zu realisieren (ARGE Monitoring PV-Anlagen 2007; Wenzel 2017).

Die Standortwahl von PV-FFA-Anlagen wird maßgeblich von rechtlichen Rahmenbedingungen (EEG) bestimmt. So sind laut Schmidt et al. (2018a) vor allem im Süden Deutschlands entlang von Autobahnen und Schienenwegen Bänder von PV-FFA-Anlagen entstanden, die einen Monotonie-Effekt hervorrufen können.

5 Standortdifferenzierte Bewertung der Mensch- und Naturverträglichkeit von PV-Freiflächenanlagen in Niedersachsen

Für eine möglichst nachhaltige Energieerzeugung durch PV-FFA sollte die Integration in die Landschaft unter mensch- und naturverträglichen Gesichtspunkten erfolgen. Gleichzeitig erfordert ein solcher Ausbau eine sensible Standortsteuerung, damit die Anlagen von der Bevölkerung nicht abgelehnt werden. Hilfreich kann hierbei eine frühzeitige Ermittlung potenziell geeigneter Standorte auf Landesebene sein, um mögliche Beeinträchtigungen zu vermeiden. Auch wenn unsicher ist, wie sich ein solcher Ausbau tatsächlich auf Natur und Landschaft auswirken wird, sollte die Standortsteuerung auf das Prinzip der vorsorgenden Planung ausgerichtet sein (United Nations Conference on Environment & Development (UNCED) 1992). Zusätzlich kann durch die Ermittlung der geeigneten Flächen für PV-FFA eine erste Abschätzung des möglichen Stromertragspotenzials abgeleitet werden.

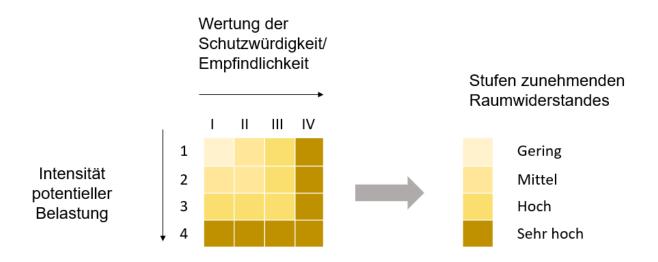
Als Grundlage für die Bewertung der Sensitivität betroffener Schutzgüter dienen die Ergebnisse aus Kapitel 4. Die Ermittlung der nachhaltig geeigneten Flächen für PV-FFA erfolgt mittels einer Raumwiderstandsanalyse in deren Ergebnis die Fläche Niedersachsens in vier Klassen für die Eignung für PV-FFA eingeteilt wird. Die Vorgehensweise wird im Folgenden Kapitel erläutert. Die einzelnen Flächenkategorien, welche in die RWS-Analyse eingeflossen sind, werden in den Kapiteln 5.2.1 bis 5.2.4 vorgestellt. Kapitel 5.2.5 beschreibt die Zuordnung zu den Raumwiderstandsklassen.

Die Flächenbilanz und räumliche Verteilung der einzelnen RWS-Klassen in Niedersachsen werden als Ergebnis in Kap. 5.3.1 vorgestellt. Ergänzend wird in Kap. 5.3.3 das Potenzial neuer PV-Technologien für die Erschließung weiterer Standorte dargestellt.

5.1 Vorgehen bei der Raumwiderstandsanalyse

Um die Flächen zu ermitteln, die für eine mensch- und naturverträgliche Produktion von Solarenergie am besten geeignet sind, wird der Raumwiderstand der Flächen gegenüber den Auswirkungen von PV-FFA auf Natur und Landschaft bestimmt. Dazu wird, wie in der ökologischen Risikoanalyse (Scholles 2008), zunächst die Empfindlichkeit der Flächen gegenüber der Belastung (pressure) durch eine angenommene Anlage eingeschätzt und dann die Relevanz (Erheblichkeit) einer möglichen Beeinträchtigung anhand der Schutzwürdigkeit bewertet. Wird die Anlage variiert (z. B. die Farbe), verändert sich auch die Empfindlichkeit. Diese Methode wird in der Umweltplanung verwendet, um die Beeinträchtigungen unter Unsicherheit (z. B. weil in der Zukunft zu erwarten) zu projizieren (Scholles 1997). Das Risiko der Beeinträchtigung wird für jedes Schutzgut nach §1 BNatSchG ermittelt und entsteht aus der Verknüpfung der erwarteten Belastungsintensität (pressure) mit der Empfindlichkeit der Schutzgüter. Die Schutzwürdigkeit der Schutzgüter wird herangezogen, um die Relevanz (Erheblichkeit) der projizierten Beeinträchtigung zu bestimmen. Dabei wird vorhandenes Wissen über die Stabilität und Flexibilität des Naturhaushaltes zugrunde gelegt, also über die Art, Stärke und Dauer der zu erwartenden Veränderung aufgrund eintreffender Belastungen (Scholles 2008). Auf Grundlage der potenziellen Belastung in Verbindung mit der Empfindlichkeit des Standortes werden insgesamt vier Raumwiderstandsklassen (RWS-Klassen) definiert. Der Raumwiderstand (RWS) und die Größe einer Fläche, auf der Belastungen zu erwarten sind, hängen dabei von den Eigenschaften der jeweiligen PV-Technologie ab. Durch dieses Vorgehen können mögliche technologische Weiterentwicklungen der Solarmodule und die dadurch veränderten Auswirkungen auf Natur und Mensch auch zukünftig im Modell berücksichtigt werden.

Die Empfindlichkeit der Schutzgüter wird mit Hilfe verschiedener Flächenkategorien abgebildet (Walter et al. 2018). Ihre Wertigkeit wurde aus naturschutzfachlichen Vorgaben des Bundes und Niedersachsens abgeleitet. Der Raumwiderstand gegen PV-FFA, ergibt sich aus der Empfindlichkeit der Schutzgüter gegen die generell von PV-FFA ausgehenden Belastungsfaktoren und der Schutzwürdigkeit (Wert) der Schutzgüter. Letzteres ist wichtig für die Beurteilung der Erheblichkeit potenzieller Beeinträchtigungen. Auf dieser Basis können für konkrete Vorhaben im Raum, deren Belastungsintensität (pressure) spezifiziert ist, die zu erwartenden Beeinträchtigungen (impact) modelliert werden.



Belastung + Empfindlichkeit + Schutzwürdigkeit = Raumwiderstand

Abb. 22: Ermittlung des ökologischen Raumwiderstandes

Die Fläche Niedersachsens wurde entsprechend der in Abb. 23 dargestellten Definitionen mit sehr hohem, hohem, mittlerem oder geringem RWS bewertet.

Die technische Umsetzung der Flächenanalyse erfolgte über ein GIS-Modell (ArcMap 10.7.1). Die Flächen Niedersachsens wurden anhand der standörtlichen Empfindlichkeit sowie ihres Wertes für den Naturschutz einer RWS-Klasse zugewiesen (Abb. 24). Für die Flächen mit geringem RWS wurde dann entsprechend des jährlichen Energieertrages (GWh/ha) der Referenzanlage (vgl. Kap. 2) das menschund naturverträgliche Stromertragspotenzial berechnet.

Einteilung des Raumwiderstandes gegenüber Freiflächenphotovoltaik



sehr hoch

Flächen mit sehr hohem Naturschutzund Erholungswert, die nicht ersetzbar sind und auf denen mit sehr hohen Auswirkungen auf Mensch und Natur zu rechnen ist.

Flächen, auf denen der Bau der jeweiligen Energieanlage verboten oder aus technischen Gründen nicht möglich ist.



hoch

Flächen mit hohem Naturschutz- und Erholungswert, die nicht oder nur schwer ersetzbar sind und die als sehr sensibel gegenüber den Auswirkungen der Energieanlage eingestuft werden.

Die Energieanlage würde zu nachhaltiger Veränderung führen.



mittel

Flächen mit mittlerem Naturschutz- und Erholungswert, die als sensibel gegenüber den Auswirkungen der Energieanlagen eingestuft werden.

Ein mittelfristiger Verlust der Funktionsfähigkeit ist zu erwarten.

Die Flächen sind nach Einzelfallprüfung und bei Anpassung der Erzeugungstechnolo gie nutzbar.



gering

Flächen mit geringem Naturschutz- und Erholungswert, auf denen es durch die Energieanlagen nur zu kurzzeitigen oder minimalen Funktionsverlusten kommt.

Die Energieanlage führt nur zu sehr geringfügigen Auswirkungen auf Mensch und Natur

Abb. 23: Definition des Raumwiderstands gegenüber der Referenzanlage im Projekt INSIDE

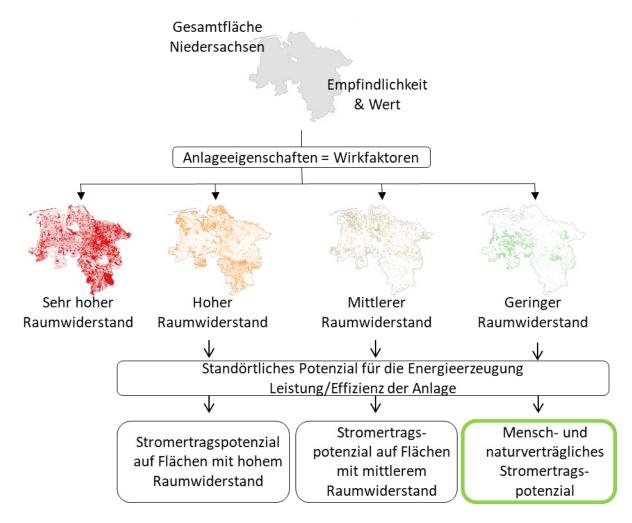


Abb. 24: Vorgehen im Projekt INSIDE bei der Ermittlung des mensch- und naturverträglichen Stromertragspotenzials aus PV-FFA

5.2 Die Raumwiderstandsanalyse zur Ermittlung der Potenzialflächen

Die Flächenkategorien zur Berücksichtigung der menschlichen Gesundheit, der Biodiversität und des Naturhaushaltes bilden die Grundlage für die Klassifizierung des RWS. Hierfür werden bestehende Datensätze im GIS überlagert (vgl. Tab. 13). Weitere wichtige Grundlagen für die Einteilung bilden technische und ökonomische Vorgaben, die sich auf die Leistung der Anlage auswirken.

Im GIS-Modell kommt es an manchen Standorten zu Überlagerungen verschiedener Flächenkategorien und RWS-Klassen. Diese Überlagerungen entstehen z. B. aufgrund natürlicher Gegebenheiten, weil ein Gewässer (sehr hoher RWS) innerhalb eines Nationalparks (sehr hoher RWS) liegt. Auch eine Überlagerung eines FFH-Gebietes (sehr hoher RWS) mit einer historisch wertvollen Kulturlandschaft (mittlerer RWS) ist möglich. Die überlagerten Flächen gleicher RWS-Klassen wurden im GIS-Modell durch eine Verschneidung zusammengeführt. Bei der Überlagerung von Flächen verschiedener RWS-Klassen wurde der jeweils höchste Raumwiderstand der Fläche als Gesamtergebnis übernommen.

Tab. 13: Flächenkategorien und Datensätze für die Einteilung der Raumwiderstände

Flächenkategorien		Information aus Datensatz	Datenquelle	
it	Siedlungsbereiche	Ortslagen		
Flächenkategorien zur Berücksichtigung der menschlichen Gesundheit		Schienen	_	
Flächenkategorien zur Berücksichtigung der menschlichen Gesund		Straßen	Basis-DLM (LGLN 2019)	
yorie gun n Ge	Infrastruktur	Autobahnen		
ateç chti iche		Flughäfen		
nenk cksi schli		Landschaftsbildbewertung	Hermes et al. 2018	
iläck Berü nens	Landschaft	Historische Kulturlandschaften	Wiegand et al. 2017	
		Nationalparks		
sitäl		Naturschutzgebiete		
iver		Vogelschutzgebiete		
3iod	Bestehende Schutzgebiete	FFH-Gebiete	NLWKN 2018a	
g der E	Schutzgebiete	Biosphärenreservat Niedersächsische Elbtalaue		
unb		Landschaftsschutzgebiete		
Flächenkategorien zur Berücksichtigung der Biodiversität	Gebiete mit hohem Wert für die Artenvielfalt Gebiete mit hohem Wert für die Vielfalt der Lebensräume	Rast- und Nahrungsflächen überwinternder nordischer Gastvögel	MU (2019)	
		Vorkommen empfindlicher Vogelarten	Krüger et al. (2014); Basis-DLM (LGLN 2019)	
ategoı		Extensivgrünland	NLWKN 2019	
chenk		Ackerwildkrautflächen		
Fläc	Biotopverbund	Landesweiter Biotopverbund	NLWKN 2018b	
Flächenkategorien zur Berücksichtigung des Boden- und Wasserhaushalts	Gebiete zum Schutz der Bodenfunktionen	Fruchtbare Böden	LBEG 2019	
kate sicht und haus	Gebiete zum	Wasserschutzgebiete	NLWKN 2019b	
Flächenkategorie Berücksichtigung Boden- und Wasserhaushalts	Schutz des Wasserhaushalts	Gewässerrandstreifen	Basis-DLM (LGLN 2019)	
Flächenkategorien zur Berücksichtigung weiterer Belange		Topografie (Hangneigung und Ausrichtung)	DOM1 (LGLN 2019)	
		Gewässer		
		Wälder	Basis-DLM (LGLN	
		Verschattungsflächen um Wälder und Gehölze	2019)	
		Hochwasser-Gefahrengebiete	NLWKN 2013	

Quellen:

- Hermes, Johannes; Albert, Christian; Haaren, Christina von (2018): Assessing the aesthetic quality of landscapes in Germany. In: Ecosystem Services 31, S. 296–307.
- Krüger, Thorsten; Ludwig, Jürgen; Pfützke, Stefan; Zang, Herwig (2014): Atlas der Brutvögel in Niedersachsen und Bremen 2005-2008. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Hannover (Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen, Heft 48).
- LBEG 2019: NIBIS-Daten: BK50-Auswertungskarte zur Bodenfruchtbarkeit (Ertragsfähigkeit), © LBEG Hannover, 2019.
- LGLN (2019): Auszug aus den Geobasisdaten des Landesamtes für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen, © 2019
 □ LGLN
- MU (2019): NG 1 Nordische Gastvögel auf Ackerland, https://www.umweltkarten-niedersachsen.de/, zuletzt abgerufen am 01.12.2019
- NLWKN (2018a): Schutzgebiete NAGBNatSchG, © 2018, geodaten@nlwkn-dir.niedersachsen.de, https://www.umweltkarten-niedersachsen.de/, zuletzt aufgerufen am 01.12.2019
- NLWKN (2018b): Niedersächsisches Landschaftsprogramm. Kapitel 4.3 Landesweiter Biotopverbund. unveröffentlicht.
- NLWKN (2019a): Landesweite Biotopkartierung Niedersachsen 1984 bis 2004, © 2019, geodaten@nlwkndir.niedersachsen.de
- NLWKN (2019b): Trinkwasserschutzgebiete, © 2019, geodaten@nlwkn-dir.niedersachsen.de
- Wiegand, C.; Platte, H.; Rohr, A.; Günnewig, D.; Johannwerner, E.; Michalczyk, J. (2017): Landesweite Erfassung, Darstellung und Bewertung der niedersächsischen Kulturlandschaften sowie historischer Kulturlandschaften landesweiter Bedeutung im Rahmen der Neuaufstellung des Niedersächsischen Landschaftsprogramms. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Hannover. Unveröffentlicht.

5.2.1 Flächenkategorien zur Berücksichtigung des menschlichen Wohlergehens und von Infrastrukturen

Siedlungsbereiche

Im Forschungsprojekt INSIDE sollten die mensch- und naturverträglichen Potenziale der Freiflächen-Photovoltaik in der freien Landschaft ermittelt werden. Die GIS-Analyse wurde daher auf den Außenbereich eingegrenzt. Siedlungsbereiche und Gebäude, deren Dachflächen ebenfalls für die Stromproduktion zur Verfügung stehen, wurden nicht in die Raumwiderstandsanalyse einbezogen (vgl. hierzu Kap. 2). Ebenfalls ausgeschlossen wurden Flächenkategorien im Bereich Infrastruktur, welche aus technischen Gründen nicht als Flächen für die in Kapitel 2 vorgestellten Anlagenvarianten nutzbar sind.

Infrastruktur

Schienenwege, Bundes-, Landes- und Kreisstraßen

Die Flächenkategorie Infrastruktur beinhaltet Schienenwege, Bundes-, Landes- und Kreisstraßen sowie Bundesautobahnen und Flughäfen bzw. Flugplätze. Die Errichtung von konventioneller PV-FFA ist auf Straßen und Schienen nicht möglich. Eine Weiterentwicklung der Technologie könnte diese Kategorien in Zukunft nutzbar machen (vgl. Kap. 2).

Flughäfen

Flughäfen bedürfen in der Regel eines Bauschutzbereichs, um einen ungehinderten Flugbetrieb sicherzustellen (§ 12 LuftVG). Daher sind Start- und Landebahnen von Flughäfen inkl. ihrer Schutzstreifen aus sicherheitstechnischen Gründen von Bebauung freizuhalten. Ein Sicherheitsabstand um das Flughafengelände wie bei Windkraftanlagen (Walter et al. 2018, S. 65), die gegen die Anforderungen an die Hindernisfreiheit verstoßen, ist aufgrund der geringen Höhe nicht notwendig (Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) 03.08.2012).

Landschaft

Landschaftsbildbewertung

Die Sicherung des Erholungswertes der freien Landschaft stellt neben der Sicherung der Vielfalt, Eigenart und Schönheit von Natur und Landschaft ein zentrales Ziel des Naturschutzes in Deutschland dar (§1 (1) BNatSchG). Um dies zu gewährleisten, müssen zur Erholung geeignete, landschaftlich wertvolle Bereiche von landschaftsfremden Objekten freigehalten werden (Herden et al. 2009).

Die Identifizierung solcher geeigneten Bereiche geschieht in der Praxis meist auf Ebene des Landkreises oder der Kommune durch verbal-argumentative Bewertungsmethoden. Mit der Methode von Hermes et al. (2018) liegt eine bundesweite Bewertung vor, die auch eine einheitliche Betrachtung von ganz Niedersachsen zulässt. Sie basiert auf den Indikatoren Vielfalt, Natürlichkeit und Seltenheit von Landschaften bzw. Landschaftsbestandteilen und einer empirischen Erhebung. Die jeweiligen werden anhand verschiedener normalisierter Subindikatoren Ausprägungen Landschaftsstrukturmaßen ermittelt. Die einzeln errechneten Indikatoren werden zusammengefasst zur landschaftsästhetischen Qualität, welche den relativen ästhetischen Wert einer Landschaft angibt. Dieser Wert wird dargestellt in Rasterzellen einer Größe von (100x100 m). Die einzelne Zelle kann einen Wert von 0-100 annehmen, wobei 100 für den höchsten in Deutschland erreichten und 0 für den geringsten Wert steht.

Um die Landschaftsbildbewertung in die Raumwiderstandsanalyse in INSIDE zu integrieren, wurde das 33%- und das 66%-Quantil aller Rasterzellenwerte in Niedersachsen berechnet und die Fläche Niedersachsens nach landschaftsästhetischer Qualität in drei Klassen eingeteilt:

Wert der Rasterzelle	Klasse
n<49	geringe landschaftsästhetische Qualität
49>n<59	mittlere landschaftsästhetische Qualität
n>59	hohe landschaftsästhetische Qualität

Historische Kulturlandschaften

Ein weiterer Bestandteil, der in die Flächenkategorie Landschaft einfließt, ist die historische Kulturlandschaft. Landschaften, die durch eine heute nicht mehr zeitgemäße Bewirtschaftung entstanden sind, bieten einen Blick in die Vergangenheit und sind unersetzbare Zeitzeugen der Landschaftsentwicklung. Für den Begriff der historischen Kulturlandschaft wird folgende Definition zugrunde gelegt:

"Die historische Kulturlandschaft ist ein Ausschnitt aus der aktuellen Kulturlandschaft, der sehr stark durch historische Elemente und Strukturen geprägt wird. Ebenso wie in einem Baudenkmal können in der historischen Kulturlandschaft Elemente aus unterschiedlichen zeitlichen Schichten nebeneinander und in Wechselwirkung miteinander vorkommen. Strukturen und Elemente einer Kulturlandschaft sind dann historisch, wenn sie in der heutigen Zeit aus wirtschaftlichen, sozialen, politischen oder ästhetischen Gründen nicht mehr in der vorgefundenen Weise geschaffen würden, sie also aus einer abgeschlossenen Geschichtsepoche stammen." (Gunzelmann und Viebrock 2001)

Der Wert dieser Landschaften entsteht also vor allem durch ihre geschichtliche Bedeutung. In Niedersachsen wurden im Rahmen der Neuaufstellung des Landschaftsprogrammes im Jahre 2017 landesweit repräsentative historische Kulturlandschaften identifiziert (Wiegand et al. 2017). Diese Gebiete stellen nicht die einzigen historischen Kulturlandschaften Niedersachsens dar, sondern wurden nach ihrem Ausmaß der historischen Prägung, ihrer Bedeutung sowie ihrer Repräsentanz ausgewählt (ebd.). Zusammen mit der Landschaftsbildbewertung nach Hermes et al. (2018) gehören historische Kulturlandschaften zu den gegenüber PV-FFA sensiblen Gebieten.

5.2.2 Flächenkategorien zur Berücksichtigung der Biodiversität

Bestehende Schutzgebiete

In der Raumwiderstandsanalyse wurden die folgenden ausgewiesenen geschützten Teile von Natur und Landschaft berücksichtigt: Nationalparks, Naturschutzgebiete, Vogelschutzgebiete, FFH-Gebiete, Biosphärenreservate (Niedersächsische Elbtalaue) und Landschaftsschutzgebiete. Abhängig von ihrem Schutzstatus wurden die Flächen unterschiedlichen Raumwiderstandsklassen zugeordnet.

Gebiete mit hohem Wert für die Artenvielfalt

Rast- und Nahrungsflächen überwinternder nordischer Gastvögel

Nordische Gastvögel sind aufgrund von Anhang I bzw. Art. 4 Abs. 2 der Vogelschutzrichtlinie geschützte Arten in Niedersachsen (vgl. Tab. 12). Das Land Niedersachsen ist dazu verpflichtet, die Lebensräume dieser geschützten Arten dauerhaft zu erhalten. Da zu den Rast- und Nahrungsflächen dieser Arten auch landwirtschaftliche Flächen außerhalb von Schutzgebieten gehören, hat das Land Niedersachsen diese Gebiete als Förderkulisse der Agrarumweltmaßnahmen aufgenommen (ML 2015). Die Agrarumweltmaßnahmen NG1 und NG3 umfassen einen finanziellen Ausgleich für

- das Bereitstellen von störungsarmen Rast- und Nahrungsflächen für durchziehende und überwinternde nordische Gastvögel sowie die Extensivierung der Nutzung von Acker (NG1) und
- das Bereitstellen von störungsarmen Rast- und Nahrungsflächen für durchziehende und überwinternde nordische Gastvögel sowie die Beibehaltung oder Extensivierung der Nutzung von Dauergrünland außerhalb der Schwerpunkträume des Wiesenvogelschutzes (NG3).

Da die Auswirkungen der PV-FFA auf nordische Gastvögel bisher nicht untersucht sind (vgl. Kap. 4), werden die Flächen der Förderkulisse vorsorglich als eigene Flächenkategorie dargestellt.

Vorkommen empfindlicher Vogelarten

Die Literaturrecherche (vgl. Kap. 4) hat aufgezeigt, welche Auswirkungen PV-FFA auf die Avifauna haben können. Für einzelne Arten wie Großer Brachvogel (*Numenius arquata*), Uferschnepfe (*Limosa limosa*), Rotschenkel (*Tringa totanus*) und Kampfläufer (*Philomachus pugnax*) (Abb. 18) sind demnach Verluste von Brut- und Nahrungshabitaten durch PV-FFA möglich. Die Verbreitungsgebiete dieser Offenlandarten konzentrieren sich im nördlichen Niedersachsen und werden im Atlas der Brutvögel in Niedersachsen Bremen 2005-2008 in Form von Rasterflächen (ca. 11x11 km) dargestellt (Krüger et al. 2014). Die genauen Fundorte der Gelege werden nicht abgebildet. Um die Lebensräume dieser Arten dennoch in der Analyse berücksichtigen zu können, wurden die Standorte möglicher Artenvorkommen über eine räumliche Zufallsverteilung innerhalb der Kacheln aufgenommen (Busch et al. 2017). Dazu wurden die potenziellen Arthabitate in Form von Landnutzungsklassen (CORINE) selektiert und mit den Kacheln verschnitten. Diese Gebiete stellen die potenziellen Bruthabitate dar. Innerhalb dieser wurden auf Basis der Anzahl angegebener Brutpaare im Brutvogelatlas zufällige Brutstandorte verteilt und vorsorglich ein Puffer von 100 m gesetzt.

Gebiete mit hohem Wert für die Vielfalt der Lebensräume

Naturschutzfachlich wertvolles Grünland (Extensivgrünland)

Extensivgrünland, also Wiesen und Weiden mit geringer Nutzungsintensität (BfN 2014a), weist einen hohen naturschutzfachlichen Wert auf und bietet Lebensraum für eine Vielzahl an Tieren und Pflanzen (Niemann et al. 2017). Es gehört zu den artenreichsten Biotoptypen Mitteleuropas und zeichnet sich im Vergleich zu Intensivgrünland durch geringen Viehbesatz und weitgehenden Verzicht auf Düngung aus (Keienburg et al. 2006). Darüber hinaus weisen Extensivgrünländer auch einen hohen Erholungswert auf und sind in vielen Regionen charakteristische Landschaftsbestandteile (Wiegand et al. 2017). Abb.

25 zeigt, dass ein großer Teil Niedersachsens durch grünlandgeprägte, offene Kulturlandschaft charakterisiert ist.

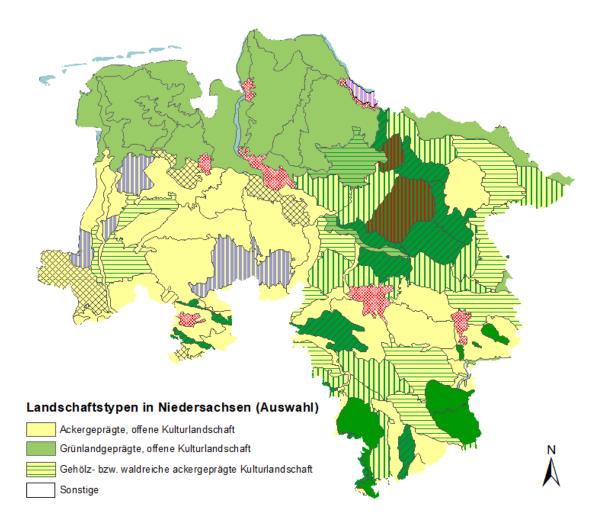


Abb. 25: Niedersachsens Landschaftstypen. Landschaftstypen mit dem höchsten Flächenanteil sind ackergeprägte offene Kulturlandschaften (13.059 km²), grünlandgeprägte, offene Kulturlandschaften (11.091 km²) und gehölz- bzw. waldreiche ackergeprägte Kulturlandschaften (5.647 km²) (Gharadjedaghi et al. 2004; BfN 2005).

Vor allem Niedersachsen und Schleswig-Holstein verzeichnen einen hohen Rückgang des Grünlandes (vgl. Abb. 26). Laut aktuellem Grünlandreport des BfN (2014a) hat die Grünlandfläche in Niedersachsen von 2003 bis 2012 um 6,54 % abgenommen. Neben der quantitativen Veränderung wirkt sich die Intensivierung der Landwirtschaft auch auf die qualitative Entwicklung des Grünlands aus. Aufgrund seines geringen wirtschaftlichen Ertrags ist Extensivgrünland sehr selten geworden und ertragreiche Intensivwiesen und Mähweiden nehmen im Vergleich zu biologisch wertvollen, extensiven Grünlandflächen zu (ebd.).

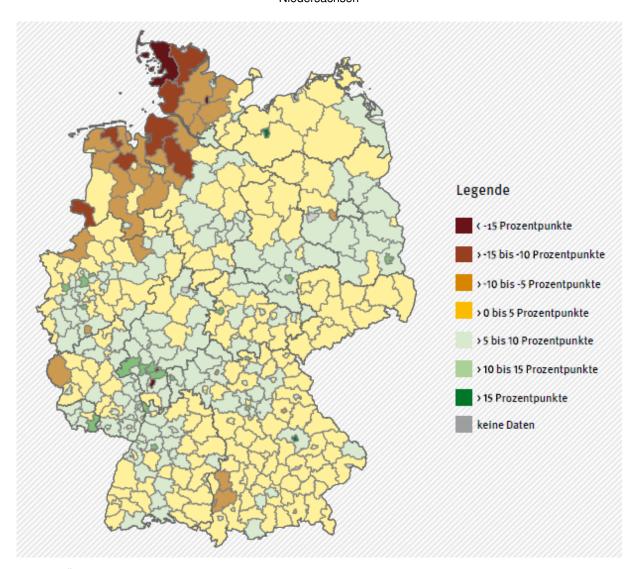


Abb. 26: Änderung des Anteils der Grünlandfläche an der landwirtschaftlich genutzten Fläche im Zeitraum 1999–2010, (Kreise, kreisfreie Städte) (UBA 2018).

Eine flächendeckende Erfassung von naturschutzfachlich wertvollem Grünland liegt für Niedersachsen nicht vor. Auch die für die Raumwiderstandsanalyse zugrunde gelegte Biotopkartierung des Landes ist selektiv und erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Es ist daher wichtig, dass für eine differenzierte Betrachtung des Raumwiderstandes auf regionaler Ebene das Modell um Daten aus den Landschaftsrahmenplänen ergänzt wird.

Biotopverbund

Landesweiter Biotopverbund

Die Schaffung eines bundesweiten Netzes verbundener Biotope auf 10% der Landesfläche ist als allgemeiner Grundsatz im Bundesnaturschutzgesetz (§20 BNatSchG) festgeschrieben. Um Zerschneidungseffekte der Landschaft zu vermeiden und die Biotopvernetzung zu fördern, sind Biotopverbindungsflächen von Infrastrukturmaßnahmen freizuhalten (§21 BNatSchG). Dies ist auch eines der Leitziele der niedersächsischen Naturschutzstrategie (MU Nds. 2017). Flächen des landesweiten Biotopverbundes Niedersachsen setzen sich aus Kernflächen und Funktionsräumen zusammen (NLWKN 2018). Kernflächen umfassen Biotopflächen des Offenlandes, der Wälder, der Fließgewässer mit ihren Auen sowie der Küstenbiotope und bilden die Knotenpunkte des Verbundes. Die Funktionsräume stellen Verbindungsflächen und -elemente nach § 21 Abs. 3 BNatSchG dar, in

denen neue Zerschneidungseffekte zu vermeiden sind (ebd.). In der Raumwiderstandsanalyse wurden die Funktionsräume der Offenland- und der naturnahen Waldlebensräume berücksichtigt.

Ackerland innerhalb des Biotopverbundes

Einen Sonderfall innerhalb des Biotopverbundes stellt Ackerland dar. Im Einzelfall kann die Umwandlung intensiv genutzter Ackerstandorte hin zu Extensivgrünland unter PV-FFA zu einer Aufwertung der Vernetzungsfunktion innerhalb des Biotopverbundes führen. Dies wurde in einer Studie von (Niemann et al. 2017) untersucht. Ziel der Studie war es, die in Verbindung mit überörtlichen Verkehrswegen bestehenden PV-FFA hinsichtlich ihrer Eignung als Vernetzungselement und mögliche Konflikte in Bezug auf die Erhaltung der Durchlässigkeit der Landschaft zu untersuchen (ebd.). Mittels einer Fang-Wiederfang-Studie von Tagfaltern im Landkreis Schaumburg sowie einer GIS-Modellierung der funktionalen Auswirkungen von 50 Anlagen auf die vorhandenen Lebensraumnetze konnte aufgezeigt werden, dass durch PV-FFA ein positiver Beitrag für Offenlandarten geleistet werden kann, dies jedoch stark von ihrer räumlichen Lage im Vernetzungsraum und den umgebenden Landnutzungen abhängt. Für Ackerland innerhalb des Biotopverbundes in Niedersachsen folgt daraus, dass PV-FFA bei sorgfältiger Planung und entsprechender Gestaltung "als funktionale Ergänzung des Straßenbegleitgrüns insbesondere in ausgeräumten Agrarlandschaften wirken können (ebd.)."

5.2.3 Flächenkategorien zur Berücksichtigung des Boden- und Wasserhaushalts

Gebiete zum Schutz der Bodenfunktionen

Fruchtbare Böden

Der Schutz und die Erhaltung der natürlichen Bodenfunktionen sind in § 2 Abs. 2 Nr. 1 und 2 BBodSchG verankert. Hierzu gehört auch das natürliche standörtliche Potenzial für die landwirtschaftliche Produktion. Sie ist abhängig von mineralogischen, physikalischen, chemischen und biologischen Bodeneigenschaften. Fruchtbare Böden sollten demnach für die Landwirtschaft vorgehalten werden, um den Betriebsmitteleinsatz gering zu halten und Ressourcen zu schonen.

Das Niedersächsische Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie empfiehlt, fruchtbare Böden im Rahmen von Planungs- und Zulassungsverfahren der Raumordnung und Bauleitplanung im Abwägungsprozess zu berücksichtigen (Bug et al. 2019). Für die Flächenanalyse wird auf die niedersachsenweite Karte zur Bewertung der Bodenfruchtbarkeit (vgl. Tab. 14, LBEG 2019) zurückgegriffen. Die Bewertung erfolgt in einer siebenstufigen qualitativen Skala (äußerst gering – äußerst hoch):

Tab. 14: Bodenfruchtbarkeitsstufen nach Bug et al. (2019)

BFR-Stufe	Beschriftung			
1	äußerst gering			
2	sehr gering			
3	gering			
4	mittel			
5	hoch			
6	sehr hoch			
7	äußerst hoch			

Gebiete zum Schutz des Wasserhaushalts

Wasserschutzgebiete

Die Zone I von Wasserschutzgebieten stellt den Fassungsbereich der Gebiete dar. Hier befindet sich der Grundwasserförderbrunnen. Der Bereich ist hochsensibel und sollte vor jeder Verunreinigung geschützt werden. Es gilt Betretungsverbot, i.d.R. wird der Fassungsbereich eingezäunt (NLWKN 2013; §§ 50 -53 WHG). Solange in Zone II der Schutzzweck des Wasserschutzgebiets gesichert bleibt, könnten PV-FFA dort aufgestellt werden, wo Standorte intensiver landwirtschaftlicher Nutzung in eine extensive Grünlandnutzung mit minimalem Maschineneinsatz überführt werden sollen (LfU 2013). Hierzu muss, durch geeignete Auflagen, für die Verträglichkeit mit dem Trinkwasserschutz gesorgt werden. In Zone IIA und B kann die Kombination von Trinkwasserschutz und Photovoltaik mitunter auch Synergien hervorrufen. PV-Anlagen in den weiteren Schutzzonen können bei fachgerechter Installation unter Berücksichtigung der Schutzzwecke eine Verbesserung des Wasserhaushaltes nach sich ziehen (ebd.).

Gewässerrandstreifen

Gewässerrandstreifen erfüllen verschiedene ökologische Funktionen, so z. B. der Schutz der Gewässer vor Stoffeinträgen, die Sicherung des Wasserabflusses und der Wasserspeicherung. Die Gewährleistung dieser Funktionen wird durch verschiedene Regelungen sichergestellt (§61 (1) BNatSchG; §36 WHG; §10 WaStrG). Da zum Zeitpunkt der Studie keine belastbaren Aussagen zum Einfluss von PV-FFA auf das Wasserabflussverhalten und den allgemeinen Wasserhaushalt möglich waren (vgl. Kap. 4), wurden Gewässerrandstreifen bis auf weiteres von der Nutzung ausgeschlossen.

5.2.4 Flächenkategorien zur Berücksichtigung technischer Restriktionen

Topografie (Hangneigung und Ausrichtung)

Für die Wirtschaftlichkeit von PV-FFA spielt die Standortwahl eine grundlegende Rolle. Ist die zu bebauende Fläche zu steil (Neigung >45°), wäre der finanzielle Konstruktionsaufwand der Anlagen am Hang zu hoch. Gleiches gilt für die Exposition der Fläche: ist die Sonneneinstrahlung im Tagesverlauf zu gering, so bei Nordhängen mit einer Neigung >30°, arbeitet die Anlage nicht wirtschaftlich. Anlagen auf Nordhängen mit einer Neigung <30° lassen hingegen immer noch einen Jahresertrag von 60% im Vergleich zu Referenzanlagen erwarten (Altmann, S. 2020).

Gewässer

Schwimmende PV-Anlagen (Floating PV) wurden in der Flächenanalyse nicht betrachtet. Die Errichtung von konventioneller PV-FFA auf Wasserflächen ist nicht möglich. Eine Weiterentwicklung der Technologie könnte diese Kategorien in Zukunft einbeziehbar machen (Enkhardt 2020c). Eine grobe Abschätzung des verfügbaren Potenzials auf niedersächsischen Gewässern findet sich in Kapitel 6.2.

Wälder und Forsten

Wälder sind u.a. für die Leistungsfähigkeit des Naturhaushalts, die forstwirtschaftliche Erzeugung und die Erholung der Bevölkerung von wesentlicher Bedeutung (§ 9 BWaldG). Eine Rodung und Umwandlung der Fläche in eine andere Nutzungsform ist nur in Ausnahmefällen möglich (ebd.). Eine Doppelnutzung von Wäldern und Photovoltaikanlagen auf der gleichen Fläche schließt sich aus technischen Gründen aus (BMVI 2015).

Verschattungsflächen um Wälder und Gehölze

Die Verschattung bzw. Teilverschattung von PV-Modulen kann mitunter zu einer drastischen Leistungsreduktion der Anlage führen (Mertens 2013). In Abhängigkeit von ihrer Höhe und Ausdehnung können verschiedene Objekte unterschiedlich lange Schatten werfen. Die flächenrelevantesten stellen Wälder (inkl. Forsten) und Gehölze dar. Diese im Tagesverlauf verschatteten Bereiche wurden in Form von Abstandsflächen um alle Wald- und Gehölzflächen im GIS nach der Methode von ??????? nachempfunden. Es wurden 50 m- und 20 m-Puffer um Wald- und Gehölzflächen angenommen.

Hochwasser-Gefahrengebiete

Gefahrengebiete gemäß Hochwasserrisikomanagementrichtlinie (HWRM-RL) sind Gebiete, in denen Hochwasser statistisch gesehen alle 100 (HQ₁₀₀) bzw. alle 20-25 Jahre auftreten (HQ_{häufig}). Sie liefern damit wichtige Informationen für z. B. Bauleitplanung, Raumplanung, Ver- und Entsorgung, Denkmalschutz und Katastrophenschutz (NLWKN 2014). Innerhalb von Gebieten mit potenziell auftretenden Hochwassern können großflächige technische Anlagen wie PV-FFA das Retentionsvermögen und das Abflussverhalten in Hochwassersituationen negativ beeinträchtigen (BMVI 2015).

5.2.5 Zuordnung der Flächenkategorien zu den RWS-Klassen

Mit den vorgestellten Flächenkategorien kann eine flächenhaft differenzierte Darstellung des RWS für ganz Niedersachsen erfolgen. Die einzelnen Flächenkategorien wurden hinsichtlich ihrer Empfindlichkeit gegenüber PV-FFA bewertet und den RWS-Klassen zugeordnet (vgl. Tab. 15). Im Folgenden wird die Zuordnung der Flächenkategorien zu den RWS-Klassen erläutert.

5.2.5.1 Sehr hoher Raumwiderstand

Auf den Flächen mit hohem RWS ist mit sehr hohen Auswirkungen der PF-FFA auf Mensch und Natur zu rechnen. Der Bau der PV-FFA ist daher verboten oder aus technischen Gründen nicht möglich. Zu diesen Flächen zählen die Schutzgebietskategorien Naturschutzgebiet, Nationalpark und die Kernzone von Biosphärenreservaten. So gilt in Naturschutzgebieten der besondere Schutz von Natur und Landschaft mit dem Verbot aller Handlungen, die zur Zerstörung, Beschädigung oder Veränderung führen können (§23 BNatSchG). Die Schutzgebiete sind von Bebauung frei zu halten. Schutzziel von Nationalparks ist der möglichst ungestörte Ablauf der Naturvorgänge in ihrer natürlichen Dynamik (§24 BNatSchG), sodass auch diese von Bebauung frei zu halten sind. Bei der Kernzone von Biosphärenreservaten handelt es sich um Totalreservate, die i.d.R. wie Naturschutzgebiete zu schützen sind (§25 BNatSchG).

Standortdifferenzierte Bewertung der Mensch- und Naturverträglichkeit von PV-Freiflächenanlagen in Niedersachsen

Die Zulässigkeit von Vorhaben in FFH-Gebieten (sowie im Wirkbereich) wird über eine FFH-Verträglichkeitsprüfung (inkl. Vorprüfung) beurteilt (Art. 6 Abs. 3 RL 92/43/EWG; § 34 BNatSchG) und ist dann gegeben, wenn das Vorhaben mit den Schutz- und Erhaltungszielen des jeweiligen Schutzgebietes vereinbar ist. Als unzulässig sind Vorhaben einzustufen, sobald die Möglichkeit der Beeinträchtigung des Gebietes besteht. Ausnahmefälle sind lediglich möglich, soweit:

- zwingende Gründe des öffentlichen Interesses für die Umsetzung des Vorhabens die Naturschutzbelange überwiegen,
- die Umsetzung des Vorhabens an anderer Stelle nicht möglich ist und
- Kohärenzsicherungsmaßnahmen in hinreichender Form vorgesehen bzw. umgesetzt wurden.

Aus rechtlicher Sicht sind PV-FFA in FFH-Gebieten also nicht a priori ausgeschlossen. Aufgrund ihrer EU-weiten Bedeutung für den Erhalt der biologischen Vielfalt werden FFH-Gebiete dennoch dem sehr hohen Raumwiderstand zugeordnet.

Auch Wälder und Forsten sind von der Nutzung für PV-FFA ausgeschlossen und haben einen sehr hohen Raumwiderstand. Hinzu kommt der Fassungsbereich von Wasserschutzgebieten (§§ 50-53 WHG) und Gewässerrandstreifen (§61 (1) BNatSchG; §36 WHG; §10 WaStrG).

Außerdem werden dem sehr hohen Raumwiderstand solche Flächenkategorien zugeordnet, auf denen PV-FFA aufgrund der technischen Anforderungen und der mangelnden Wirtschaftlichkeit nicht umgesetzt würden. Hierzu zählen Siedlungsbereiche, Infrastruktur (Schienen, Straßen, Autobahnen), Gewässer, Flughäfen, alle Flächen mit einer Neigung >45° sowie alle Flächen nördlicher Exposition mit einer Neigung >30° und Verschattungsflächen um Wälder und Gehölze.

5.2.5.2 Hoher Raumwiderstand

Auf den Flächen mit hohem RWS ist damit zu rechnen, dass die PV-FFA zu einer nachhaltigen Veränderung des Landschaftsbildes und des Naturhaushaltes führt. Diese Flächen stellen daher kein nutzbares Flächenpotenzial dar.

Der hohe Raumwiderstand umfasst mit den Flächen der Kategorie "Landesweiter Biotopverbund" die Funktionsräume der landesweiten Biotopverbundflächen der Wälder und der halboffenen Landschaften.

Standorte mit einer sehr hohen bis äußerst hohen Bodenfruchtbarkeit sind von PV-FFA freizuhalten. Im Falle von naturschutzfachlich wertvollem Grünland bzw. Extensivgrünland ändern sich bei einer Überschirmung mit PV-Modulen viele Einflussfaktoren, wie z. B. die Sonneneinstrahlung, der Wasserhaushalt und das Mahdregime. Die Anlage von PV-FFA auf diesen Flächen sollte daher vermieden werden.

Für die Vorkommen empfindlicher Vogelarten wird ein hoher RWS gegenüber PV-FFA angenommen. Da die Untersuchungen zu den Auswirkungen auf die Vogelwelt Niedersachsens auf einen potenziellen Lebensraumverlust hinweisen, sollten nachweislich zur Brut- und Nahrungssuche genutzte Habitate von Großer Brachvogel (*Numenius arquata*), Uferschnepfe (*Limosa limosa*), Rotschenkel (*Tringa totanus*) und Kampfläufer (*Philomachus pugnax*) PV-FFA freigehalten werden (vgl. Kap. 4). Gleiches gilt für die Rast- und Nahrungsflächen überwinternder nordischer Gastvögel.

Darüber hinaus sollten Landschaften mit einer hohen landschaftsästhetischen Qualität zur Erholung von Überbauung freigehalten werden und werden daher mit einem hohen Raumwiderstand gegenüber PV-FFA bewertet.

Da innerhalb von Gebieten mit potenziell auftretenden Hochwassern großflächige technische Anlagen das Retentionsvermögen und das Abflussverhalten in Hochwassersituationen negativ beeinträchtigen können (BMVI 2015), fallen auch Hochwassergefahrengebiete unter den hohen Raumwiderstand.

5.2.5.3 Mittlerer Raumwiderstand

Flächen des mittleren RWS sind nach Einzelfallprüfung und bei Anpassung der Erzeugungstechnologie für PV-FFA nutzbar. Da die Flächen der Kategorie "Landschaftsschutzgebiete" in der Praxis relativ großflächig ausgewiesen werden, können PV-FFA in Einzelfällen realisiert werden, soweit die Ziele der Schutzgebietsverordnung dies zulassen und der Gebietscharakter unbeeinträchtigt bleibt (§ 26 BNatSchG; (BMVI 2015; BUND 2011; NABU 2005).

Darüber hinaus sind die Flächen der mittleren Landschaftsbildbewertung und historische Kulturlandschaften als sensibel gegenüber der Anlage von PV-FFA einzustufen. Im Einzelfall können an das Landschaftsbild angepasste Anlagen umgesetzt werden, solange der historische Gebietscharakter dadurch nicht überprägt wird.

Da auch Biosphärenreservate zur Umsetzung der Nachhaltigkeitsziele beitragen müssen, ist die Integration erneuerbarer Energien in zukünftigen Maßnahmenkonzepten unerlässlich (Deutsche UNESCO-Kommission 2017). Anders als in der Kernzone von Biosphärenreservaten kann in den äußeren Zonen die Erprobung schonender Wirtschaftsweisen unter Umständen auch die Nutzung erneuerbarer Energien beinhalten (Gehrlein et al. 2017). Daher ist hier die Integration von Solarenergie nach Einzelfallprüfung denkbar. Durch ihren Charakter als nachhaltige Modellregionen können hier vor allem innovative technische Anpassungen der Anlagen umgesetzt werden.

Nicht alle in Niedersachsen durch Vogelschutzgebiete geschützten Arten sind durch PV-FFA gefährdet. Nach Prüfung können Anlagen in diesen Schutzgebieten umgesetzt werden, soweit die Ziele der Schutzgebietsverordnung dies zulassen. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass noch nicht hinreichend belegt ist, welche langfristigen Auswirkungen ein verstärkter Ausbau der PV-FFA auf die Avifauna haben wird. Gerade in Niedersachsen gibt es kaum Feldversuche an bestehenden Anlagen, um gesicherte Aussagen treffen zu können. Die Flächenkategorie "Vogelschutzgebiete ohne PV-FFAsensible Arten" wird daher dem mittleren und nicht dem geringen RWS zugeordnet.

Auf den Flächen der Kategorie "Ackerland innerhalb des Biotopverbundes" können PV-FFA bei sorgfältiger Planung und entsprechender Gestaltung zur Aufwertung der Vernetzungsfunktion beitragen. Hierbei sind die Kleinteiligkeit der Landschaft und die Lage im Verbundkorridor ausschlaggebend.

5.2.5.4 Geringer Raumwiderstand

Zu den für eine mensch- und naturverträgliche Energieversorgung gut geeigneten Flächen gehören ertragsschwache Ackerflächen, die sich nicht mit einer der Flächenkategorien der höheren Raumwiderstände überschneiden. Als ertragsschwach werden Böden der Bodenfruchtbarkeitsstufen "sehr gering" bis "äußerst gering" eingestuft (vgl. Tab. 14). An solchen, landwirtschaftlichen Grenzertragsstandorten ist die Errichtung von PV-FFA nicht nur meist wirtschaftlicher, sondern kann durch die Extensivierung der Landnutzung bzw. der Landnutzungsänderung von Acker in extensiv genutztes Grünland auch zu naturschutzfachlicher Aufwertung führen (Montag et al. 2016).

Ähnliches gilt für intensiv bewirtschaftete Grünländer, die außerhalb von Schutzgebieten liegen und einen geringen naturschutzfachlichen Wert aufweisen. Diese eignen sich für die Anlage von PV-FFA. Auch hier kann die Reduktion der Mahdtermine, Verzicht auf Düngemittel und Pestizideinsatz zu einer naturschutzfachlichen Aufwertung führen. Bedingung dafür ist eine extensive Bewirtschaftung sowie der Abgleich mit der Landschaftsplanung, welche Funktionen die Fläche auf regionaler oder lokaler Ebene erfüllt.

Die Zonen III A und B von Wasserschutzgebieten weisen eine geringe Empfindlichkeit gegenüber PV-FFA auf. Die Kombination von Trinkwasserschutz und Photovoltaik kann mitunter auch Synergien

hervorrufen, wenn PV-Anlagen bei fachgerechter Installation unter Berücksichtigung der Schutzzwecke (LfU 2013) eine Verbesserung des Wasserhaushaltes nach sich ziehen. Schlussendlich ist der Bau von PV-FFA auf Standorten einer geringen landschaftsästhetischen Qualität ("Landschaftsbildbewertung gering") ebenfalls mit einem geringen RWS zu beurteilen.

Tab. 15: Übersicht über die Zuordnung der Flächenkategorien zu den RWS-Klassen entsprechend ihrer Empfindlichkeit gegenüber der Referenzanlage

		Sehr hoher Raumwiderstand	
:	Naturschutzgebiete Nationalparks Biosphärenreservate: Kernzone FFH-Gebiete Wasserschutzgebiete Zone I Gewässerrandstreifen Wälder und Forsten	 Infrastruktur (Schienen, Straßen, Autobahnen) Gewässer und Nordsee Flughäfen 	 Topografie (Hangneigung und Ausrichtung) Verschattungsflächen um Wälder und Gehölze
		Hoher Raumwiderstand	
	Biotopverbund: Funktionsräume Wald und halboffene Landschaft (wenn kein Ackerstandort) Landschaftsbildbewertung sehr hoch (obere 33%)	 Extensivgrünland Ackerland (hohe bis äußerst hohe Bodenfruchtbarkeit) Vorkommen gegenüber PV-FFA empfindlicher Vogelarten außerhalb von Schutzgebieten 	 Rast- und Nahrungsflächen überwinternder nordischer Gastvögel Hochwasser- Gefahrengebiete (HQ₁₀₀ und HQ_{häufig})
		Mittlerer Raumwiderstand	
	Landschaftsschutzgebiete Biosphärenreservate: Pflege- und Entwicklungszone	 Historische Kulturlandschaften Niedersachsens Landschaftsbildbewertung mittel (mittlere 33%) 	 Wasserschutzgebiete Zone II Vogelschutzgebiete ohne PV-FFA- sensible Arten Ackerland innerhalb des Biotopverbundes
		Geringer Raumwiderstand	
•	Ackerland auf ertragsarmen Böden außerhalb der genannten Flächenkategorien	 Landschaftsbildbewertung gering (untere 33%) 	 Wasserschutzgebiete Zone III A und B Grünland außerhalb der genannten Flächenkategorien

5.3 Das mensch- und naturverträgliche Stromertragspotenzial aus Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Niedersachsen

Auf Flächen mit geringem RWS ist eine mensch- und naturverträgliche Stromerzeugung durch PV-FFA möglich (vgl. Abb. 24). Der erzeugte Energieertrag ist, unter anderem, abhängig von der Leistungsdichte der jeweiligen Anlage. Für die Ermittlung des Stromertragspotenzials in Niedersachsen wurde der jährliche Energieertrag der in Kapitel 2 vorgestellten Anlagenvarianten (Variante 1 - 3) als Berechnungsgrundlage verwendet. Diese basieren auf gemittelten Einstrahlungs- und Wetterdaten, die am ISFH in Emmerthal zwischen 1992 und 2018 gemessen wurden.

Tab. 16: Leistungsdichte und jährlicher Energieertrag der verschiedenen Anlagenvarianten zur Berechnung des Stromertragspotenzials

Variante	Anlagentyp	Leistungsdichte (MW/ha)	Jährlicher Energieertrag (GWh/ha)
1	Referenzanlage	1,01	1,09
2	Flächenertragsoptimiert	1,52	1,45
3	Winterertragsoptimiert	0,47	0,5

Das Stromertragspotenzial wird hier verstanden als der theoretisch generierbare Stromertrag in Abhängigkeit der verfügbaren Fläche und Leistung der Anlage. Die Berechnung erfolgte über folgende Formel:

Verfügbare Fläche (ha) x Energieertrag (1,09 GWh/ha) = Stromertragspotenzial (GWh)

5.3.1 Flächenbilanz und räumliche Verteilung

Die Auswertung des GIS-Modells zeigt, dass in Niedersachsen große nachhaltig nutzbare Flächenpotenziale für Freiflächen-Photovoltaik vorliegen (Tab. 17). Alle Flächen des geringen Raumwiderstandes werden im Folgenden als für PV-FFA geeignete Flächen bzw. Potenzialflächen bezeichnet.

Der größte Flächenanteil in Niedersachsen hat einen **sehr hohen Raumwiderstand** gegenüber PV-FFA. 45 % des Landes sind nicht für PV-FFA geeignet (Abb. 27). Hier stechen die Waldgebiete in Harz und Solling sowie bei Celle und im Heidekreis hervor. Auch deutlich erkennbar sind die Lüneburger Heide sowie größere Siedlungsbereiche in Hannover, Braunschweig, Wolfsburg und Bremen.

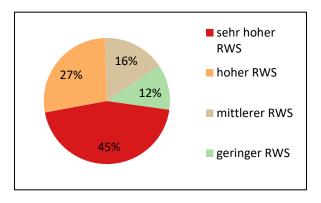


Abb. 27: Prozentualer Anteil der Raumwiderstandsklassen an der Gesamtfläche Niedersachsens

Standortdifferenzierte Bewertung der Mensch- und Naturverträglichkeit von PV-Freiflächenanlagen in Niedersachsen

Flächen des **hohen Raumwiderstandes** konzentrieren sich im Norden und im Süden des Landes. Im südlichen Teil sind dies vor allem die fruchtbaren Böden der Börde an der Mittelgebirgsschwelle südlich Hannovers und Teile des Landkreises Osnabrück, die besonders gut für landwirtschaftliche Nutzung geeignet sind. Im Norden sind überwiegend die Küstenregionen auffällig hoch vertreten, was auf den dort hohen landschaftsästhetischen Wert zurückzuführen ist. Auch der Lauf der Weser ist hier gut nachzuvollziehen.

Gebiete im **mittleren Raumwiderstand** belegen 16% der Landesfläche und befinden sich vermehrt im Nordwesten und im südwestlichen Teil (Grafschaft Bentheim, Emsland, Osnabrück und Diepholz) sowie um Gifhorn und Lüchow-Dannenberg. Viele dieser Bereiche sind auf Landschaftsschutzgebiete und Regionen mittlerer landschaftsästhetischer Qualität zurückzuführen.

Nach Abzug der mittleren bis hohen Raumwiderstandsklassen wird die übrige Fläche Niedersachsens dem geringen Raumwiderstand zugeordnet. Dies entspricht 563.279 Hektar, bzw. ca. 12 % der Landesfläche. Vor allem im südwestlichen Landesteil sind große Bereiche für PV-FFA geeignet. Da kleinere Flächen in der Kartendarstellung leicht übersehen werden, zeigt Tab. 17 die genauere Flächenbilanz in den Landkreisen. Die Landkreise mit dem größten Flächenpotenzial liegen demnach zwischen dem Emsland und Hannover (vgl. Abb. 29). In diesen Kreisen findet sich mehr als ¾ des Flächenpotenzials (Emsland, Cloppenburg, Osnabrück, Diepholz, Oldenburg, Vechta, Uelzen, Nienburg, Hannover, Peine). Dabei stellen die Landkreise Cloppenburg und Emsland allein 26% der insgesamt in Niedersachsen geeigneten Flächen.

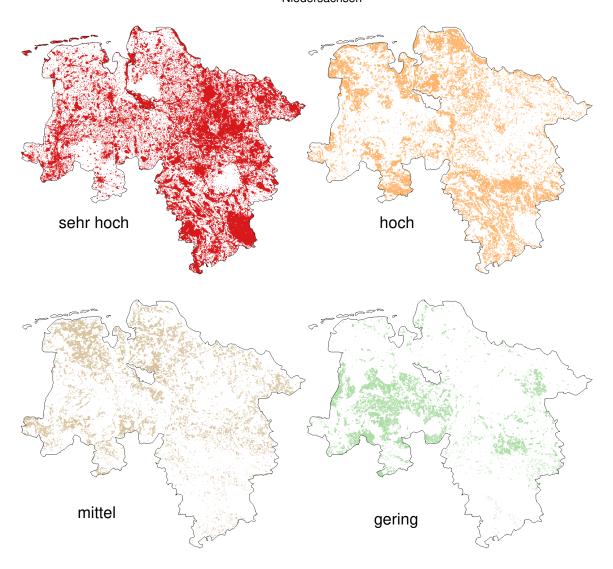


Abb. 28: Verteilung der Raumwiderstände (Referenzanlage) in Niedersachsen. Eine vergrößerte Ansicht befindet sich in Anhang C.

Tab. 17: Verteilung der Raumwiderstände (Referenzanlage) in den Landkreisen in Hektar. Die letzte Spalte zeigt den Anteil des geringen Raumwiderstandes an der Kreisfläche

Flächenverteilung der Raumwiderstände nach Landkreisen (in ha)					
Kreis	gering	mittel	hoch	sehr hoch	Anteil RWS gering an Kreisfläche (%)
Ammerland	3.614	25.708	18.564	25.124	4,95
Aurich	2.135	38.515	53.130	35.888	1,65
Braunschweig	2.137	1.004	3.368	12.751	11,10
Bremen	182	25	16	21.894	0,82
Bremerhaven	177	4	176	6.409	2,61
Celle	8.677	15.709	18.614	111.981	5,60
Cloppenburg	69.773	10.828	11.363	49.975	49,16

Standortdifferenzierte Bewertung der Mensch- und Naturverträglichkeit von PV-Freiflächenanlagen in Niedersachsen

Cuxhaven	9.026	54.470	80.591	61.645	4,39
Delmenhorst	503	2.184	174	3.381	8,06
Diepholz	47.107	44.467	39.602	67.701	23,69
Emden	52	1.026	6.056	4.104	0,46
Emsland	78.591	36.467	42.952	130.137	27,27
Friesland	2.213	20.083	22.043	17.523	3,58
Gifhorn	13.123	29.407	29.407	92.673	7,97
Goslar	2.260	3.580	18.794	71.982	2,34
Göttingen	2.270	10.967	51.492	110.673	1,29
Grafschaft Bentheim	10.367	29.965	19.057	38.632	10,58
Hameln Pyrmont	1.304	5.087	32.156	41.135	1,64
Hannover	27.057	28.697	53.823	119.968	11,79
Harburg	3.128	19.600	28.539	73.475	2,51
Heidekreis	3.717	16.235	34.368	133.686	1,98
Helmstedt	9.708	10.108	19.256	28.436	14,38
Hildesheim	3.787	5.103	59.275	52.585	3,14
Holzminden	263	1.878	21.464	45.760	0,38
Leer	6.566	24.872	45.639	31.784	6,03
Lüchow-Dannenberg	1.131	26.135	18.108	77.309	0,92
Lüneburg	1.552	19.360	31.774	80.029	1,17
Nienburg/Weser	29.264	16.595	35.478	58.553	20,92
Northeim	2.217	3.485	49.769	71.305	1,75
Oldenburg	39.521	12.680	13.085	51.419	33,86
Osnabrück	62.658	38.355	94.738	28.038	28,00
Osterholz	2.014	24.446	37.411	1.310	3,09
Peine	19.617	4.931	27.447	1.623	36,59
Rotenburg (Wümme)	3.906	48.115	71.990	83.299	1,88
Salzgitter	1.147	452	9.434	11.404	5,11
Schaumburg	3.529	7.579	23.072	33.305	5,23
Stade	2.193	24.791	55.057	44.653	1,73
Uelzen	30.117	16.360	17.352	82.353	20,60
Vechta	33.403	7.403	8.287	32.261	41,06
Verden	8.369	17.418	21.294	31.796	10,61
Wesermarsch	2.807	17.887	43.948	18.027	3,39
Wilhelmshaven	629	1.630	2.488	5.936	5,89
Wittmund	2.974	33.928	13.452	15.536	4,51
Wolfenbüttel	8.025	4.880	34.294	25.170	11,09
Wolfsburg	469	3.686	2.885	13.413	2,29
Summe	563.279	766.107	1.321.283	2.156.041	
·	•	•	•	•	

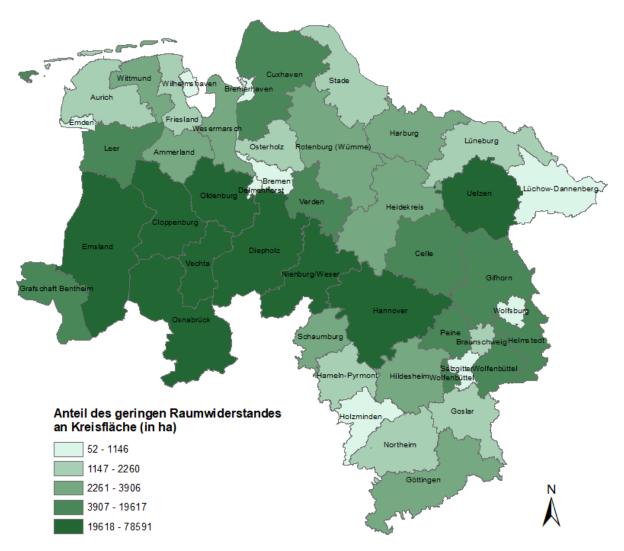


Abb. 29: Räumliche Verteilung des geringen Raumwiderstandes nach Landkreisen. Je dunkler die Fläche, desto höher ist der Anteil an verfügbarer Fläche für PV-FFA (Einteilung in Quintilen)

5.3.2 Stromertragspotenzial im geringen Raumwiderstand

Auf mehr als 560.000 Hektar der Landfläche Niedersachsens ist eine natur- und sozialverträgliche Energieerzeugung durch Freiflächenphotovoltaik (Referenzanlage) möglich. Nach aktuellem Stand der Technik können PV-FFA auf einem Hektar jährlich 1,09 GWh Energie erzeugen (Kap. 2.1). Daraus ergibt sich für die betrachteten niedersächsischen Flächen ein Potential von 614 TWh (Abb. 30).

Durch die auf Flächenertrag optimierte Anlage (Variante 2) würde der jährliche Energieertrag auf 817 TWh ansteigen, durch die höhere Anlagendichte auf der Fläche würde dies jedoch größere Auswirkungen auf Biodiversität, Boden und Wasserhaushalt nach sich ziehen. Selbst bei der auf Winterertrag optimierten Anlage mit der geringsten Leistung liegt der jährliche Energieertrag bei 282 TWh. Dies zeigt, dass Niedersachsen über ausreichend Fläche für PV-FFA verfügt, selbst wenn diese eine geringe Leistungsdichte aufweisen.

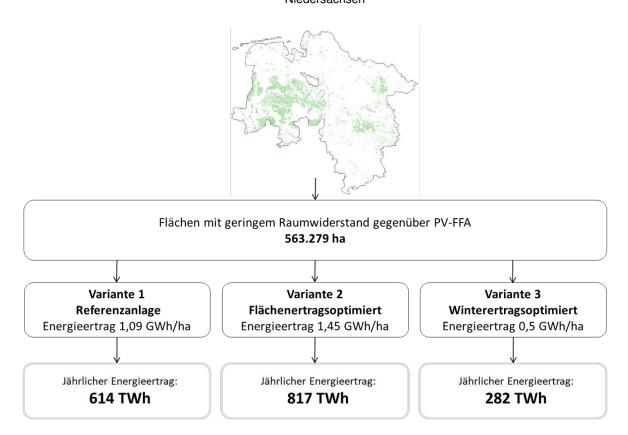


Abb. 30: Jährlicher Energieertrag der in Kap. 2 vorgestellten PV-FFA-Typen

Natürlich kann davon ausgegangen werden, dass nicht alle Flächen des geringen RWS für den Ausbau der Solarenergie benötigt werden und auch nicht, dass alle Flächen durch denselben Anlagentyp bebaut werden. Die Kulisse soll lediglich den großen Spielraum für einen weiteren nachhaltigen Ausbau dieser Energietechnologie aufzeigen.

Weiteres Potenzial besteht auf Flächen mit mittlerem RWS, die unter Umständen ebenfalls menschund naturverträglich nutzbar sind. Genaue Aussagen sind auf dieser Maßstabsebene jedoch nicht möglich. Dazu müsste das RWS-Modell auf die regionale Ebene übertragen werden. Deshalb muss die Eignung von Flächen des mittleren RWS im Einzelfall vor Ort geprüft werden. Dennoch soll eine erste, grobe Abschätzung dieses zusätzlich erschließbaren Potenzials durch innovative PV-FFA im folgenden Kapitel vorgestellt werden.

5.3.3 Zusätzlich erschließbare Standorte durch Agrophotovoltaik und andere technisch angepasste Varianten

Die sehr flexible technische Anpassungsfähigkeit von Photovoltaikanlagen an Standortgegebenheiten ermöglicht die Erschließung zusätzlicher Flächen, die für die Referenzanlagen ungeeignet wären. Die in Kapitel 2 vorgestellten Anlagenvarianten bieten die Möglichkeit, Landnutzungskonflikte und Beeinträchtigungen des Landschaftsbildes zu reduzieren.

In INSIDE wurde auf Basis folgender Annahmen berechnet, wie viel zusätzliches Flächenpotenzial mensch- und naturverträglich nutzbar wäre:

 a) Durch technische Anpassungen lässt sich PV-FFA wesentlich schonender ins Landschaftsbild integrieren als bisher. Der Einsatz farblich angepasster Module (vgl. Kap. 2.3), neuer Anlagenvarianten (bspw. Anlagentyp 3 - Dirmingen, Kap. 3) und verstärkte Berücksichtigung technisch-ökologischer Synergien z. B. in Zusammenhang mit dem

- Biotopverbund, Grundwasserschutz und Bodenregeneration, Umweltbildung und nicht zuletzt dem Klimaschutz (Niemann et al. 2017; Hernandez et al. 2014; UM BaWü 2019) verringern den Raumwiderstand gegenüber PV-FFA.
- b) Durch den Einsatz der APV-Varianten (vgl. Kap 3) wäre eine Doppelnutzung von landwirtschaftlichen Flächen möglich. Hierfür eignen sich alle drei in Kapitel 3.2 vorgestellten Anlagentypen (Anlagentyp 1, Heggelbach; Anlagentyp 2, Weihenstephan; Anlagentyp 3, Dirmingen). Der Flächendruck auf produktiven Standorten würde somit entschärft.

Das GIS-Modell wurde daraufhin angepasst, da die neuen Technologien eine Neubewertung des Raumwiderstands zulassen. Flächen der Kategorie "Landschaftsbildbewertung mittel" wurden nun dem geringen RWS zugeordnet. Beim Einsatz der APV-Technologie können auch Flächen der Kategorie "Ackerland (hohe – äußerst hohe Bodenfruchtbarkeit)" in Nutzung genommen werden und wurden ebenfalls dem geringen RWS zugeordnet.

Eine Erweiterung der Flächenkulisse des geringen Raumwiderstandes durch eine mensch- und naturverträglichere Ausgestaltung der PV-Technik hat enorme Auswirkungen auf das Flächenpotenzial (Abb. 31). Zusätzlich zu den schon bestehenden 563.000 Hektar des geringen Raumwiderstandes, würden weitere 992.000 Hektar für PV-FFA nutzbar, so dass insgesamt 32% der Fläche Niedersachsens verfügbar wären. Auf diesen Flächen ist jedoch mit einem geringeren Stromertrag zu rechnen, da die zulässigen Anlagen im Vergleich zu den Referenzanlagen eine geringere Leistungsdichte aufweisen (0,395 MW/ha bis 0,875 MW/ha).

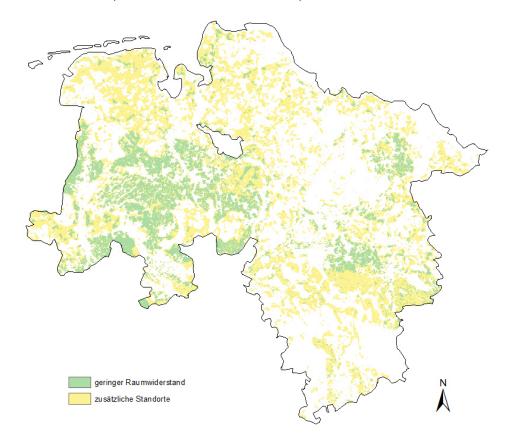


Abb. 31: Für PV-FFA zusätzlich geeignete Flächen durch technische Anpassungen und Einsatz von APV in Niedersachsen

6 Weitere Flächenpotenziale für PV in Niedersachsen

6.1 Dachflächen-PV

Aufdach-Photovoltaikanlagen stehen nicht in Flächenkonkurrenz zu Landwirtschaft oder Naturschutz und besitzen deswegen eine wesentlich größere Akzeptanz als Freiflächenanlagen. Aufdachanlagen sind allerdings auch teurer als Freiflächenanlagen. Aktuelle Anlagen können je nach Ausrichtung und Größe des Daches Strom zum Preis von etwa 8-12 ct/kWh liefern. Für Flächen mit aufgrund geringerer Einstrahlung höheren Gestehungskosten existiert derzeit kein Geschäftsmodell. Da PV-Module immer preisgünstiger werden, könnten in Zukunft auch heute noch nicht wirtschaftlich nutzbare Dachflächen Potential für die Solarenergienutzung bieten. Eine Beschreibung des Dachflächenpotentials in Niedersachsen in Abhängigkeit der Kosten für PV-Strom ist bisher nicht bekannt. Um zu einer groben Abschätzung für das Dachflächenpotential in Niedersachsen zu gelangen, kombinieren wir Ergebnisse zweier Forschungsprojekte, die derzeit an IUP und ISFH bearbeitet werden.

Im Forschungsprojekt "Konkretisierung von Ansatzpunkten einer naturverträglichen Ausgestaltung der Energiewende, mit Blick auf strategische Stellschrauben" (EE100-konkret), bearbeitet vom IUP in Zusammenarbeit mit mehreren Instituten der Leibniz Universität Hannover sowie dem Fraunhofer IEE und der TU Berlin, wurden im Auftrag des Bundesamtes für Naturschutz (BfN) Berechnungen zur Ermittlung der bundesweiten Potenzialflächen für Aufdach-Photovoltaik durchgeführt (vgl. Thiele et al. in Vorbereitung).

Grundlage ist eine räumliche Analyse der Hausumringe. Hausumringe sind georeferenzierte Umringpolygone von Gebäudegrundrissen, die auf Datensätzen der Landesvermessungsverwaltungen der Bundesländer basieren (BKG 2015). Diese Datensätze enthalten allerdings keine Informationen zu Dachformen oder -ausrichtungen.

Zur Konkretisierung der Berechnung wurden daher 3D-Gebäudemodelle in den Geoverarbeitungsworkflow integriert (Thiele et al. in Vorbereitung). Aus 3D-Gebäudemodellen (LoD2) kann die exakte Dachneigung abgeleitet werden, so dass eine Einordnung der Dachtypen (Schräg- und Flachdach) erfolgen kann. Dachflächen mit einer Neigung ≤ 5° wurden demnach als Flachdächer selektiert, Dachflächen mit einer Neigung >5° als Schrägdächer. Je Siedlungstyp des Basis-DLM (AdV 2015) wurde anschließend der prozentuale Anteil der Schräg- bzw. Flachdächer ermittelt.

Folgende weitere Annahmen liegen der Berechnung der Dachflächenpotenziale nach (Thiele et al. in Vorbereitung) zugrunde:

Schrägdach:

- Reduktionswert 30 % aufgrund von Verbauungen und Verschattung
- Kein Ausschluss aufgrund der Ausrichtung
- Mittelwert der Dachneigung von 35°
- Keine Einschränkungen durch Denkmalschutz oder Statik

Flachdach:

- Reduktionswert 35 % aufgrund von Verbauungen
- Keine Einschränkungen durch Denkmalschutz oder Statik

Unter diesen Annahmen wurde für die Gebäude in Niedersachsen eine potenziell für die Installation von Solarmodulen nutzbare Dachfläche von rund 20.090 ha Flachdächern und 34.533 ha Schrägdächern ermittelt. Die Berechnung der potenziellen Erträge und damit des wirtschaftlich nutzbaren Potentials,

hängt vom Gebäudestandort, der Ausrichtung des Gebäudes, der Dachneigung sowie dem angenommenen Wirkungsgrad der Module ab.

Im Rahmen des vom niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur geförderten Forschungsprojekt "Modellieren der Energiesystemtransformation unter besonderer Berücksichtigung der Solarenergie", bearbeitet vom ISFH in Zusammenarbeit mit mehreren Instituten der Leibniz Universität Hannover, wurde eine Verschattungsanalyse für eine Stichprobe von 18054 Dächern in Hannover durchgeführt, die eine Bestimmung der erzielbaren spezifischen PV-Erträge auf diesen Dächern erlaubt, und somit eine Abschätzung des Anteils der wirtschaftlich nutzbaren Dachfläche an der Gesamtfläche ermöglicht.

Zur Bestimmung der Wirtschaftlichkeit bei den in Zukunft weiter sinkenden Kosten für PV nehmen wir an, dass sich auch in Zukunft lohnen wird, für 10 ct/kWh PV-Strom auf Dächern zu erzeugen. Die zukünftigen Kosten für Dachflächen-PV-Anlagen schätzen wir auf 681 €/kWp im Jahr 2030 und 546 €/kWp im Jahr 2050. Mit einer Anlagennutzungsdauer von 25 Jahren, laufenden jährlichen Kosten von 2% der Investition, einer jährlichen Degradation von 0,25%, sowie gewichteten Kapitalkosten von 4,1% ergibt sich ein jährlicher Ertrag von 606 kWh/a in 2030 und 486 kWh/a in 2050, die pro 1 kW installierter PV-Leistung mindestens erreicht werden sollten, um Strom für 10 ct/kWh erzeugen zu können.

Es zeigt sich, dass innerhalb der Stichprobe bei den Flachdächern im Jahr 2030 94,88% und im Jahr 2050 97,14% der Dachfläche über genügend Einstrahlung für eine PV-Nutzung verfügen. Bei den Schrägdächern sind im Jahr 2030 85,20% und im Jahr 2050 91,41% der untersuchten Dachfläche theoretisch für PV nutzbar. Wird das volle Potential genutzt, so ergibt sich im Jahr 2030 ein durchschnittlicher Solarertrag von 890 kWh/kW für Flachdächer und von 902 kWh/kW für Schrägdächer. Für das Jahr 2050 verringern sich die durchschnittlichen Erträge leicht auf 882 kWh/kW für Flachdächer und 889 kWh/kW für Schrägdächer.

Nicht berücksichtigt bei dieser Abschätzung wurden die Verschattung durch andere Objekte als Gebäude (insbesondere Bäume), Beschränkungen aufgrund von Baustatik, alternativer Dachflächennutzung als Terrasse oder Gründach oder auch Denkmalschutz.

Unter der Annahme, dass die Stichprobe zur Bestimmung des wirtschaftlich nutzbaren Anteils der Dachfläche repräsentativ für ganz Niedersachsen ist, können wir eine obere Potentialgrenze für Aufdachanlagen im Jahr 2050 angeben. Diese beträgt 19516 ha Solarmodule auf Flachdächern und 31565 ha Solarmodule auf Schrägdächern. Mit dem in der Referenzanlage in Kapitel 2 eingesetzten Solarmodul Canadian Solar HiKu CS3W-400, das eine mittlere Flächenleistung von 181 kW/m² hat, ergibt sich daraus eine Obergrenze für die installierte Kapazität von 89,7 GW. Der durchschnittliche Jahresertrag aller Anlagen läge bei voller Ausnutzung des Potentials bei 886 kWh/kW.

Die Abschätzungen aus beiden Projekten geben eine Obergrenze an. Für eine weitere Eingrenzung des wirklich nutzbaren Potentials wären Untersuchungen zum Einfluss von baulichen Restriktionen und eine Verschattungsanalyse, die eine Verschattung durch Bäume mit einbezieht, nötig. Das wirtschaftliche Potential hängt bei genauer Betrachtung nicht nur von den Gestehungskosten, sondern auch von der Eigentümer- und Nutzerstruktur vor Ort ab. Seit der EEG-Novellierung 2014 muss z. B. für PV-Anlagen mit mehr als 10 kW Leistung eine Abgabe ("Eigenverbrauchsumlage") auf selbst erzeugten und genutzten PV-Strom gezahlt werden, was für viele Anlagenbetreiber das wirtschaftliche Potential einer Solaranlage auf dem Dach auf 10 kW begrenzt, auch wenn das technische Potential deutlich höher wäre. Auch auf großen Dachflächen kann es durch die Obergrenze von 750 kW für EEG-Anlagen wirtschaftlicher sein, nur einen Teil eines Daches mit Modulen zu belegen. Im Rückblick ist auch festzustellen, dass in Niedersachsen in den 20 Jahren von der Erstfassung des EEG im Jahr 2000 bis heute, gerade einmal 3,2 GW an Dachflächen-PV installiert wurden, also nur 3,6% des hier abgeschätzten Potentials genutzt wurden, obwohl für den größten Teil des Potentials immer eine Wirtschaftlichkeit gegeben war.

Da PV-Aufdachanlagen in einem erneuerbar geprägten Energiesystem voll konvertibel zu PV-Freiflächenanlagen und teilweise konvertibel zu Windenergieanlagen sind, gleichzeitig aber wesentlich weniger Akzeptanzfragen berühren, sollte genauer untersucht werden, wie sich dieses Potential auch in Niedersachsen wesentlich besser heben ließe als bisher.

Sowohl zu den Möglichkeiten, eine weitgehend vollständige Nutzung des Dachflächenpotentials zu erreichen, als auch zu den Optionen, die kleineren Alternativpotentiale sinnvoll zu erschließen, gibt es bislang wenig fundiertes Wissen, hier besteht entsprechender Forschungsbedarf. Vier Bundesländer (Bremen, Hamburg, Berlin und Baden-Württemberg) versuchen mit ordnungsrechtlichen Vorschriften (Pflicht zur Errichtung von Solaranlagen unter bestimmten Bedingungen) die Nutzung des Dachflächenpotentials zu erhöhen. Für eine weitgehend vollständige Nutzung muss die Errichtung einer Solaranlage aber ähnlich selbstverständlich werden, wie ein Anschluss an das Stromnetz oder der Einbau von Fenstern.

6.2 Schwimmende PV-Kraftwerke

Auch Wasserflächen können für die Photovoltaik genutzt werden, zumindest sofern es sich um ein stehendes Gewässer handelt. Schwimmende PV-Anlagen kosten etwa 10%-15% mehr als an Land installierte Anlagen, belegen dafür aber keine anderweitig nutzbaren Flächen. Durch die Reflektion und den Kühleffekt der Wasseroberfläche ist zudem der flächenspezifische Ertrag gegenüber der vergleichbaren PV-FFA leicht erhöht. Zusätzlich reduziert die schwimmende PV-Anlage die Verdunstung des Wassers, was bei Wasserreservoirs ebenfalls ein Vorteil sein kann. Bei natürlichen Seen und renaturierten Wasserflächen ist eine Nutzung aber aus Naturschutzsicht bedenklich, weil die Überbauung und die dadurch resultierende Verschattung einen deutlichen Eingriff in das Biotop darstellen.

Das Fraunhofer ISE hat das technische Potential für schwimmende PV Kraftwerke auf den Seen der Braunkohletagebaue in Deutschland untersucht (Enkhardt 2020c; Fraunhofer ISE 03.02.2020). Diese sind Kandidaten für schwimmende Photovoltaik da sie ökologisch teilweise sehr stark beeinträchtigt sind und infrastrukturell für eine Einbindung in die Stromversorgung bereits erschlossen sind. Während die Gesamtfläche der Tagebauseen ein technisches Potential von 56 GW bieten würde, kommt die Untersuchung nach Berücksichtigung der Flächenbedarfe anderer Nutzungsarten wie z. B. für Naturschutz und Tourismus zu einem realisierbaren Potential von knapp 3 GW, entsprechend einem Anteil von 5,3% des technischen Potentials.

Niedersachsen verfügt perspektivisch (die Flutung läuft momentan) im ehemaligen Helmstädter Revier über etwa 1000 ha an Seenfläche ehemaliger Braunkohletagebaue. Allerdings wird hier mit dem Tourismus- und Erholungsgebiet Lappwaldsee schon eine Nachnutzungsstrategie verfolgt, die die touristische Nutzung und den Naturschutz in den Mittelpunkt stellt und nicht die Nutzung durch Floating-PV (Stadt Helmstedt 2012).

Zur Abschätzung eines Potentials für schwimmende PV-Anlagen auf den weiteren 32.586 ha Seenfläche in Niedersachsen müssten die Umweltauswirkungen dieser auf die aus naturschutzfachlicher Sicht oft wertvollen Gewässerflächen besser bekannt sein. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass sich gerade ehemalige Braunkohlegebiete oder auch ausgebaggerte Kiesgruben zu attraktiven, wertvollen Naturschutzstandorten entwickeln können. Für eine Nutzung dieser und anderer Flächen für Floating-PV muss daher der Einfluss einer PV-Anlage auf die ökologische Entwicklung des Standorts sorgfältig berücksichtigt werden und die Erschließung von neuen EE-Potentialen gegen eine mögliche Beeinträchtigung der Entwicklung potenzieller neuer Lebensräume abgewogen werden.

6.3 PV auf Abraumhalden der niedersächsischen Salzindustrie

Niedersachsen verfügt über sieben größere Kaliabraumhalden. Momentan plant die K+S, die in Niedersachsen befindlichen Rückstandshalden abzudecken und anschließend zu rekultivieren. Aus ökologischer Sicht wären die Abraumhalden der niedersächsischen Salzindustrie gut für PV geeignet, da es sich um stark beeinträchtigte Flächen handelt. Sinnvoll genutzt werden könnten die Halden mit einer Hangneigung von weniger als 45° und einer Hangneigung von weniger als 30° in nördlicher Richtung. Da Haldenabwässer aufgrund ihrer Salzsättigung ein Problem darstellen, würde hier eine Bauweise, die den Durchtritt von Regenwasser verhindert, einen Doppelnutzen erzielen.

Eine Anfrage bei der K+S ergab, dass eine Nutzung mit PV-Anlagen bereits erwogen wurde. Aufgrund der Beschaffenheit des Baugrundes Salz wird diese Nutzungsform als - zumindest kurzfristig - nicht umsetzbar betrachtet.

Im Wortlaut lauten die Ausführungen von K+S wie folgt:

"K+S hat bereits verschiedene Möglichkeiten zur Energiegewinnung an den verschiedenen Halden eruiert und ist dabei zu dem Ergebnis gekommen, dass sich kurzfristig keine Möglichkeit zur Nutzung der Haldenflächen ergibt. Eine direkte Bebauung der Halden ist auf Grund des schwierigen Baugrundes (Salz) nicht möglich, da lokale Lösungserscheinungen in Folge von Niederschlag zu einem Versagen des Baugrundes führen würden. Auch die Möglichkeit der Abdeckung mit Solarfolien (Kunststoffdichtungsbahnen mit eingearbeiteten Solarpanelen) wurde geprüft, aber auch von den Herstellern als nicht umsetzungsfähig eingeschätzt.

Die Halde Sigmundshall wird in einem besonderen Verfahren (Dünnschichtverfahren) abgedeckt. Dieses ermöglicht eine hangparallele Abdeckung, durch die dünnmächtige Abdeckschicht entsteht jedoch kein nutzbarer Baugrund und die Schüttwinkel zwischen 35° und 38° ermöglichen nicht die notwendige Arbeitssicherheit zur Errichtung von Solaranlagen, sodass dieser Standort grundsätzlich für eine solche Nachnutzung ausgeschlossen werden kann.

Für die Halden Niedersachsen und Friedrichshall wurde keine Nachnutzung durch Solaranlagen im Rahmen der Abdeckung beantragt. Die Nachnutzung der Halden Siegfried-Giesen und Hugo sieht ebenfalls eine Haldenabdeckung mit Begrünung vor. Dabei steht insbesondere die Verdunstung von Wasser durch die Vegetation im Vordergrund, sodass aktuell keine Solaranlagen vorgesehen sind, weiterhin muss berücksichtigt werden, dass bis eine Nachnutzung überhaupt erfolgen kann, das entsprechende Genehmigungsverfahren durchgeführt und eine Abdeckung erfolgt sein muss. Eine kurzfristige Nutzung ist also ohnehin nicht möglich.

Eine wirtschaftliche Betrachtung wurde nicht umfänglich durchgeführt, da eine Bebauung mit Solaranlagen bereits auf Grund der technischen Herausforderungen ausgeschlossen wurde. Die Halden Hansa und Ronnenberg liegen nicht im Zuständigkeitsbereich der K+S, die Halde Hansa wurde bereits abgedeckt und auch für die Halde Ronnenberg ist eine Abdeckung geplant, Auch für diese Halden wird keine Nutzung durch Solaranlagen erwartet."

6.4 PV an und in Kombination mit Verkehrsinfrastruktur

PV-Schallschutzwände

Eine weitere Möglichkeit Photovoltaikanlagen zu installieren, ohne zusätzliche Fläche damit zu belegen, ist die Nutzung von Schallschutzwänden für die senkrechte Installation. In diesem Fall sollten unabhängig von der Ausrichtung der Schallschutzwand im unverschatteten Bereich bifaziale Module als Wandelemente verwendet werden, oder bei schon vorhandenen Schallschutzwänden beide

Wandseiten belegt werden. Diese Anlage hat Ähnlichkeit mit dem zaunähnlichen APV-Anlagentyp "Dirmingen".

Bei Straßen (Bundes- und Landstraßen) könnten bei einer beidseitigen vier Meter hohen Schallschutzwand in Niedersachsen 800 kW pro Kilometer installiert werden, wenn nur die oberen beiden Meter (als verschattungsärmerer Bereich) belegt werden. In diesem Fall bleibt auch die Möglichkeit für PKW-Insassen, in die Landschaft zu schauen erhalten, wenn in den unteren beiden Metern transparente Wände installiert werden oder dieser Bereich frei bleibt (falls kein Schallschutz erforderlich ist). Werden die Wände komplett aus Photovoltaikmodulen gebaut, so verdoppelt sich das Potential auf 1600 kW pro Kilometer, wobei der Ertrag der unteren Module durch Verschattung durch Verkehr und Vegetation reduziert wird.

Würden alle Bundes- und Landstraßen in Niedersachsen, die nicht durch Bäume oder Gehölze verschattet sind (9111 km, eigene Berechnung IUP), im verschattungsfreien Bereich mit Lärmschutzwänden aus Photovoltaik belegt, ergäben sich eine Kapazität von 7,3 GW und ein erwarteter Stromertrag von 7,2 TWh pro Jahr.

Bei Autobahnen könnten bei einer beidseitigen 4 Meter hohen Schallschutzwand 1600 kW pro Kilometer installiert werden, da die Schallschutzwände auf beiden Seiten weit genug voneinander entfernt stehen, um sich nicht zu verschatten.

Würden die Autobahnen in Niedersachsen, die nicht durch Bäume oder Gehölze verschattet sind (1264 km), mit Lärmschutzwänden aus Photovoltaik belegt, ergäben sich eine Kapazität von 2,0 GW und ein erwarteter Stromertrag von 2,0 TWh pro Jahr.

Auch bei Schienenwegen könnten bei einer beidseitigen 5 Meter hohen Schallschutzwand 800 kW pro Kilometer installiert werden, wenn nur die oberen beiden Meter belegt werden. Würden die Schienenwege in Niedersachsen, die nicht durch Bäume oder Gehölze verschattet sind (3486 km) im verschattungsfreien Bereich mit Lärmschutzwänden aus Photovoltaik belegt, ergäben sich eine Kapazität von 2,8 GW und ein erwarteter Stromertrag von 2,8 TWh pro Jahr.

Insgesamt ergibt sich für die niedersächsischen Straßen- und Schienenwege ein technisches Potential von bis zu 12 GW installierter Leistung. Zur vollständigen Hebung dieses technischen Potentials müsste aber jeder Verkehrsweg mit 4 oder 5 m hohen Wänden beidseitig entlang der Strecke versehen werden, was kaum vorstellbar erscheint. Das realistische Potential zur Installation von Solarenergie an überregionalen Verkehrswegen schätzen wir daher wesentlich kleiner ein. Laut Statistik des BMVI waren entlang der Autobahnen und Bundesstraßen in Niedersachsen im Jahr 2016 125 km Schallschutz- und Steilwälle sowie 338 km Lärmschutzwände installiert (BMVI 2016). Das bedeutet, dass tatsächliche Installationen für Lärmschutz an gerade 2,2% der für die Berechnung des technischen Potentials ermittelten Streckenabschnitte existieren. Für die Schienenwege wird in der Praxis immer häufiger auf bodennahe Niedrigschallschutzwände zurückgegriffen, die sich nicht für eine Belegung mit Photovoltaik eignen. Bezieht man die Größenordnung der tatsächlich Lärmschutzmaßnahmen und die Entwicklung im Schienenverkehr mit in die Überlegungen ein, so reduziert sich das Potential von 12 GW auf 0,2 GW.

Parkplätze

Die Überdachung von Parkplätzen ist ebenfalls geeignet, um die knappe Ressource Fläche doppelt zu nutzen. Die so entstehenden Solarcarports werten den Parkplatz durch die Überdachung auf und ermöglichen die Installation von ca. 2,25 kW PV pro Parkplatz (Leitner 2020). Würde man eine Million Parkplätze in Niedersachsen überdachen, könnten so 2,25 GW an PV Kapazität geschaffen werden.



Abb. 32: Solar-Carport am Flughafen Weeze (Foto: Airport Weeze).

Wirtschaftlich ist die Nutzung allerdings schwierig, da bei dieser Installationsform die Investition pro kW PV-Kapazität für kleinere bis mittlere Parkplätze (~20 Stellplätze) etwa dreimal so hoch ist wie bei der Freiflächen-PV-Referenzanlage (Leitner 2020). Für größere Anlagen greifen Skalierungseffekte, allerdings bleiben Carport-Anlagen aufgrund der aufwändigeren Konstruktion immer teurer als Freiflächenanlagen. Dass sich Anlagen auf Parkplätzen in Deutschland wirtschaftlich schwertun, erkennt man auch an den Projekten, die bisher verwirklicht wurden. Die ersten auch größeren Anlagen dieser Art wurden bereits in den Jahren 2010/2011 errichtet und damals positiv rezensiert (Reeh 2010; Archiv 2011). Die größte Anlage dieser Art mit 1350 überdachten Parkplätzen und 4 MW Leistung ist am Flughafen Weeze in Nordrhein-Westfalen entstanden (Abb. 32, Airport Weeze 21.09.2016). Im Vergleich zu Dachanlagen und Freiflächenanlagen haben sich die Anlagen auf Parkplätzen aber nicht in der Breite durchsetzen können, da ein rentables Geschäftsmodell fehlt. In der Kombination mit einer Elektrotankstelle sind PV-Carportplätze in einigen Fällen derzeit wieder möglich (ZfK 2018). Um dieses Potential in Zukunft mehr zu nutzen, müssen also Regelungen gefunden werden, die unter Berücksichtigung des Doppelnutzens die hohe spezifische Investition angemessen adressieren.

7 Visualisierung von PV-Freiflächenanlagen in vier niedersächsischen Landschaften

Das Bundesland Niedersachsen weist aufgrund der sehr verschiedenartigen Lebensräume zwischen Küsten und Mittelgebirgen eine hohe Vielfalt an Landschaftstypen auf. Die verschiedenen Landschaftstypen sind unterschiedlich gut für Erzeugung von Strom aus PV-FFA geeignet, da die Anlagen unterschiedliche Auswirkungen auf Biodiversität und Landschaftsbild haben (vgl. Kap. 5). Um die Auswirkungen eines Ausbaus der PV-Nutzung, insbesondere auf das Landschaftsbild, zu verdeutlichen, wurden Visualisierungen der in Kap. 2 und 3 beschriebenen Technologievarianten in drei typischen Landschaften in Auftrag gegeben. Diese bildeten die Grundlage für erste Akzeptanzuntersuchungen und den Austausch mit unterschiedlichen Akteuren im Rahmen von Befragungen und Expertengesprächen (Kap. 8).

7.1 Methodik der Visualisierung

Visualisierungen werden in der Planung erfolgreich eingesetzt, um den Informations- und Meinungsaustausch zwischen den verschiedenen Akteuren zu erleichtern (Lovett et al. 2015). Sie lösen Diskussionen aus und erzeugen neue Perspektiven auf die Planung, die die Beteiligten sonst vielleicht nicht eingenommen hätten (Warren-Kretzschmar 2011). Mit der Hilfe von Visualisierungstechniken können die in der Regel abstrakten politischen Zielvorgaben zum Ausbau der erneuerbaren Energien veranschaulicht und räumlich konkret diskutiert werden. Visualisierungen eignen sich daher sehr gut zur Einbindung der Bevölkerung in komplexe Entscheidungsprozesse (Boll 2016).

Darstellungen in Form von Standbildern sind zwar sehr realistisch, ihre Interaktivität ist jedoch sehr begrenzt (Lovett et al. 2015). Vordefinierte Standpunkte erschweren es, den Betrachtenden alternative Perspektiven anzubieten (Lovett et al. 2015). Standbilder bleiben immer auch subjektiv, da die Blickwinkel, die Aufnahmebereiche und die Qualität von einzelnen Personen ausgewählt sind und dies die Wahrnehmung der Landschaft durch den Betrachter beeinflussen kann. Auch der feste Winkel, der Fokus und die Größe der Bilder beeinflussen das Ergebnis (Onitsuka et al. 2018).

Sie zeigen beispielsweise Perspektiven, die bei der normalen Bewegung durch die Landschaft nur für einen kurzen Moment wahrgenommen würden (vgl. Warren-Kretzschmar 2011). In der Realität wird die Landschaft durch die Bewegung der betrachtenden Person abwechslungsreicher wirken, da eine Drehung des Kopfes weg von der PV-FFA genügen würde, um eine neue Perspektive und eine weitere Sicht in die Landschaft zu haben (Boll 2016).

Die visualisierten Standbilder können aber insbesondere dann gut verwendet werden, wenn mehrere mögliche Veränderungen oder Szenarien, wie beispielsweise verschiedene PV-FFA, auf einer gleichen, statischen Grundlage (Landschaftsfoto) gezeigt werden (Lovett et al. 2015). Die Beurteilung der Visualisierungen ist unkompliziert und unabhängig von Vorkenntnissen über die Gebiete oder technologischen Sachverstand möglich. Sie können darüber hinaus in verschiedenen Kommunikationsformaten verwendet werden, z. B. gedruckt sowie digital bei Veranstaltungen oder im Internet (Lovett et al. 2015).

Im Projekt INSIDE wurden die Visualisierungen durch das Büro für Landschaftsvisualisierung Lenné 3D umgesetzt. Hierfür wurden Fotos von insgesamt vier Landschaften Niedersachsens aufgenommen, um die zukünftige Solartechnologie besonders nah an der Realität darstellen zu können. Die Standorte für die Fotoaufnahmen wurden so gewählt, dass die Eigenart der niedersächsischen Landschaft erkennbar ist, gleichzeitig aber die konkrete Fläche nicht von der Bevölkerung erkannt werden kann. Die Bilder sollten also keine Elemente mit hohem Wiedererkennungswert enthalten. Es sollte bei den Befragten

nicht der Eindruck entstehen, dass auf den abgebildeten Flächen tatsächlich ein Projekt für eine PV-FFA in Planung ist. Die Vorauswahl des Standortes erfolgte mit Hilfe von Luftbildern. Vor Ort wurden dann je Standort 20 Landschaftsfotos aus Fußgängerperspektive aufgenommen, um die Module sowohl in Ost-West-Richtung als auch in Südausrichtung mit Schattenwurf und in ihrer Höhe korrekt darstellen zu können.

Im zweiten Schritt wurden 3D-Modelle der im Forschungsvorhaben definierten PV-FFA erstellt (vgl. Kap. 2 und Kap. 3), mit Varianten in der Farbgebung oder in der Anordnung auf der Fläche. Darüber hinaus wurde ein Modell des derzeit üblichen Stabgitterzaunes angelegt. Um die Proportionen der Anlage nachvollziehbar zu machen wurden die Module mit einer Beispielperson dargestellt. Abb. 33 zeigt die erstellten 3D-Modelle der einzelnen Anlagenvarianten aus verschiedenen Perspektiven (noch ohne Landschaftskontext).

Tab. 18: Die Variationen der Visualisierung im Projekt INSIDE

Technologie	Referenzanlage	Flächenetrags- optimiert	Winterertrags- optimiert	APV-Typ "Heggelbach"	APV-Typ "Weihenstepha	APV-Typ "Dirmingen"
Landschaft	B/G	B/G	B/G	B/G	B/G	B/G
Zevener Geest	1*/1*	1/0	1*/1*	1/0	1/0	1/0
Bersenbrücker Land	1/0	1/0	1/0	1/0	1/0	1/0
Innerste Bergland	1/1	1/0	1/0	1/0	1/0	1/0
Ostfriesische Seemarschen	1/0	1/0	1/0	1/0	1/0	1/0

^{*:} mit Zaun; B: blaue Module; G: grüne Module

Anschließend wurden die gerenderten Bilder mit den Fotoaufnahmen der Landschaften zusammengeführt. Insgesamt wurden von den sechs Technologievarianten 31 Visualisierungen erstellt (vgl. Tab. 18). Variante 1 (Referenzanlage) und 3 (winterertragsoptimiert) wurden als derzeit am weitesten verbreitete Technologien in der Visualisierung mit und ohne Zaun dargestellt. Da in einigen Quellen die blaue Farbe der Module und die Reflektion der Sonne als störend für das Landschaftserleben beschrieben wird (vgl. Kap. 4.4), wurde beispielhaft in zwei Landschaften der Einsatz von grünen Modulen modelliert. Hierfür wurden die Zevener Geest und das Innerste Bergland ausgewählt, um die Auswirkungen auf das Landschaftserleben sowohl in einer flachen, als auch in einer hügeligen Landschaft abschätzen zu können.

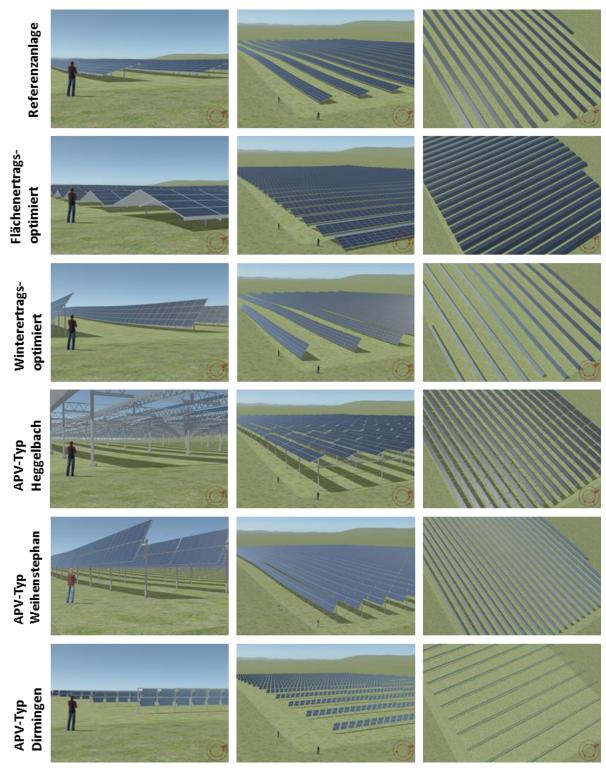


Abb. 33: Modellierung der PV-FFA im Projekt INSIDE (Einzelgrafiken Lenné3D GmbH 2020)

7.2 Repräsentative Landschaften in Niedersachsen

Grundlage für die Auswahl der Standorte für die Landschaftsaufnahmen bildet die Klassifizierung von Landschaftstypen des Bundesamtes für Naturschutz (BfN). Insgesamt zehn der dort definierten Landschaftstypen sind in Niedersachsen zu finden (vgl. Abb. 34).

Die Landschaftstypen mit dem höchsten Flächenanteil an der Gesamtfläche Niedersachsens sind "ackergeprägte offene Kulturlandschaften (AoK)" mit 13.059 km², "grünlandgeprägte, offene Kulturlandschaften (GoK)" mit 11.091 km² sowie "gehölz- bzw. waldreiche ackergeprägte Kulturlandschaften (GwK)" mit 5.647 km² Fläche (vgl. Tab. 19).

Tab. 19: Landschaftstypen und Landschaften in Niedersachsen (nach (BfN 2014b))

Landschaftstyp (nach BfN)	Landschaften mit dem höchsten Flächenpotenzial
Ackergeprägte, offene Kulturlandschaft	Cloppenburger Geest, Syker Geest, Bersenbrücker Land
Grünlandgeprägte, offene Kulturlandschaft	Ostfriesische Geest, Zevener Geest, Wesermünder Geest
Gehölz- bzw. waldreiche ackergeprägte Kulturlandschaft	Ostheide, Lingener Land, Innerste Bergland

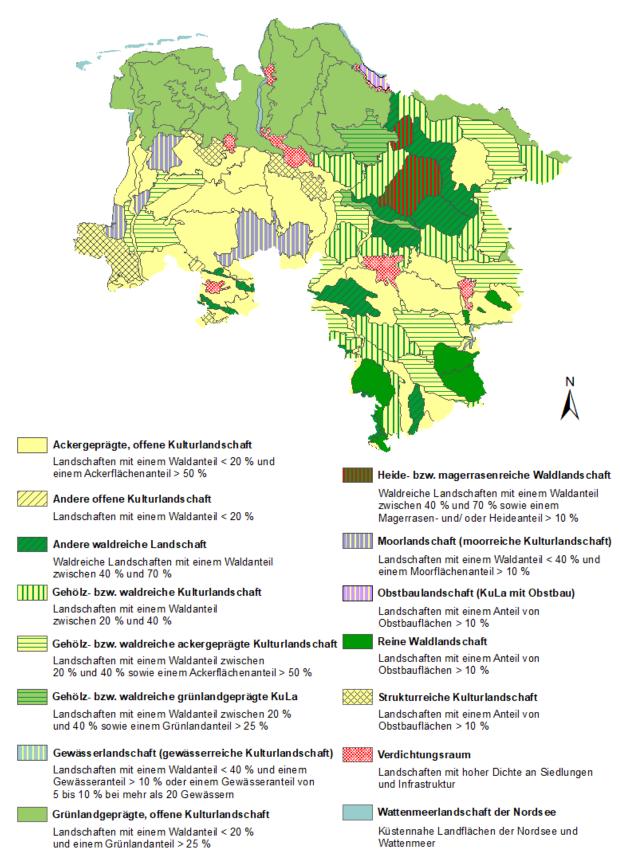


Abb. 34: In Niedersachsen vorkommende Landschaftstypen (nach (BfN 2012e))

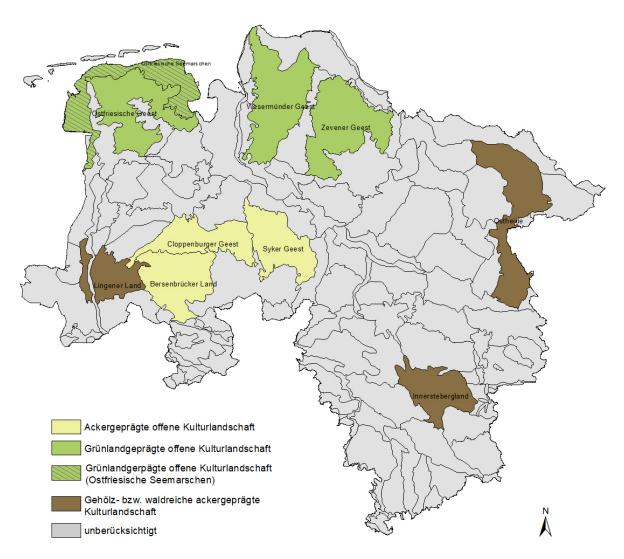


Abb. 35: Landschaften mit den höchsten Flächenpotenzialen für PV-FFA in Niedersachsen

Innerhalb dieser Landschaftstypen wurden anschließend die drei Landschaften mit den höchsten mensch- und naturverträglichen Flächenpotenzialen ermittelt (vgl. Tab. 19 und Abb. 35). Dies waren das Bersenbrücker Land (für den Landschaftstyp AoK), die Zevener Geest (für den Landschaftstyp GoK) und das Innerste Bergland (für den Landschaftstyp GwK). Als vierte Beispiellandschaft wurden darüber hinaus die Ostfriesischen Seemarschen ausgewählt, die eine ganz besondere Eigenart und, aufgrund der starken touristischen Nutzung, eine große Bedeutung für die landschaftsbezogene Erholung in Niedersachsen haben. Im Folgenden werden die Besonderheiten der vier Landschaften kurz dargestellt.

Bersenbrücker Land

Charakteristisch für das 1228 km² große Bersenbrücker Land ist die in den Eiszeiten entstandene Abfolge aus Endmoränenbögen (Ankumer Höhe, Dammer Berge), Zungenbecken in Eisrandlage (das Artland) und die Flussauenlandschaft der Hase (BfN 2012a). Knapp 56 % der Fläche werden ackerbaulich genutzt (Wiegand et al. 2017). Der Raum um Vechta gehört darüber hinaus zu den Zentren der Massentierhaltung in Deutschland (BfN 2012a). Die Gegend ist verhältnismäßig dünn besiedelt, insbesondere mit Einzelhöfen, Streusiedlungen und Haufendörfern.

Reich strukturierte Wiesen und Weiden, sowie ein hoher Anteil an Bruchwäldern kennzeichnen die Landschaft ebenso wie Laubwälder, ehemalige Hudewälder, Wallhecken und Einzelgehölze, die zu insgesamt 18 % Waldfläche führen (Wiegand et al. 2017).

Das Bersenbrücker Land ist geprägt durch viele mäandrierende Fließgewässer, unter anderem die Hase, die das Gebiet von Süd nach Nord durchfließt. Insbesondere im Artland entwässern viele Gräben und Kanäle aus dem 19. und 20. Jahrhundert die Flächen (Wiegand et al. 2017). Der Anteil der Schutzgebiete (FFH-, Vogelschutz- und Naturschutzgebiete) betrug im Jahr 2010 3% der Gesamtlandschaftsfläche (BfN 2012a) .

Im Bersenbrücker Land wurde eine Fläche nahe der Ortschaft Ankum für die Visualisierung einer PV-FFA ausgewählt (vgl. Abb. 36).





Abb. 36: Beispielfläche zur Visualisierung von PV-FFA im Bersebrücker Land (Punkt und Pfeil geben Standort und Blickrichtung des Fotografen an) (Lenné3D GmbH 2020)

Zevener Geest

Die 1645 km² große Zevener Geest ist eine Geestplatte aus pleistozänen Grundmoränen und somit eine trockene, sandige Landschaft, die stark landwirtschaftlich geprägt ist. Die maximalen Höhen von ca. 50 m an der Ostgrenze senken sich langsam nach Westen auf 20 bis 30 m ab. Die Geestlandschaft wird durch die Niederungen der Schwinge, Aue, Este und Oste untergliedert (BfN 2012d). Hier zeigen sich viele Quellbereiche und teilweise naturnah verlaufende Bäche und kleine Flüsse, ebenso wie kleinflächige, nährstoffarme Stillgewässer (Wiegand et al. 2017).

In den Bach- und Flussniederungen sind außerdem Niederungsböden verbreitet, auf denen sich Hochmoore ausgebildet haben, die in den vergangenen beiden Jahrhunderten jedoch weitgehend entwässert und abgetorft wurden (Wiegand et al. 2017). Grünland- und Ackernutzung sind gleichmäßig verteilt. Charakteristisch ist ein geringer Waldanteil, der mit 16 % deutlich unter dem Landesdurchschnitt von 21,5 % liegt (Wiegand et al. 2017). Insgesamt 6,3 % der Gesamtlandschaft stehen als FFH oder Naturschutzgebiete unter Schutz (BfN 2012d).

Für die Zevener Geest wurde ein Standort in der Gemeinde Twistenbostel als repräsentativ ausgewählt (vgl. Abb. 37).





Abb. 37: Beispielfläche zur Visualisierung von PV-FFA in der Zevener Geest (Punkt und Pfeil geben Standort und Blickrichtung des Fotografen an) (Lenné3D GmbH 2020)

Innerstebergland

Das Innerstebergland ist der östlichste Teil des Leineberglandes und schließt sich nordwestlich an den Harz an. Die 911 km² große Landschaft umfasst das Einzugsgebiet der mittleren Innerste. Charakteristisch sind die aus Schichtrippen aufgebauten Höhenzüge wie der Hildesheimer Wald, die Heinberge, die Lichtenberge, Heber und Harplage, die eine gleichmäßige Höhe von 250 bis 300 m aufweisen. Innerste und Nette trennen die Höhenzüge und fließen in schwach gewellten Becken mit mächtigen Lößböden (BfN 2012b). Diese fruchtbaren Böden werden intensiv ackerbaulich genutzt, während Grünlandnutzung auf weniger als 5 % der Gesamtfläche stattfindet (Wiegand et al. 2017).

Die Höhenrücken werden forstwirtschaftlich genutzt, wobei ca. 75 % der Fläche mit Laubhölzern, überwiegend Buche, bestockt sind (BfN 2012b). Stellenweise finden sich noch artenreiche Eichen-Hainbuchenwälder als Relikte der früheren Mittelwaldnutzung (Wiegand et al. 2017). In den Bergen wurde seit dem Mittelalter Keupersandstein in großen Steinbrüchen abgebaut, welche heute größtenteils stillgelegt sind, aber das Landschaftsbild prägen (BfN 2012b).

Im Innerstebergland wurde eine am Hang liegende Fläche in der Gemeinde Sottrum als Beispielfläche ausgewählt (vgl. Abb. 38).





Abb. 38: Beispielfläche zur Visualisierung von PV-FFA im Innerstebergland (Punkt und Pfeil geben Standort und Blickrichtung des Fotografen an) (Lenné3D GmbH 2020)

Ostfriesische Seemarschen

Die 1186 km² großen Ostfriesischen Seemarschen sind vom Meer und den Gezeiten geprägt. Holozäne Ablagerungen des Meeres, vornehmlich Tone, bilden den Untergrund (BfN 2012c). Die Marschen wurden schon früh eingedeicht und sind im Laufe der Zeit durch Entwässerung abgesackt (Sietland). Die zuletzt eingedeichten Gebiete (Polder) liegen dagegen in der Höhe des mittleren Hochwassers. Auf den leichten Erhöhungen der Marsch, meist künstliche Aufschüttungen wie Wurten oder Warften, liegen die älteren Siedlungen (Wiegand et al. 2017).

Weite und oft baumlose Acker- oder Grünlandgebiete prägen die Landschaft, in der kaum Höhenunterschiede erkennbar sind. Es dominieren großräumige, weitgehend gehölzfreie Grünländer, die 43 % Flächenanteil erreichen und durch zahlreiche Gräben entwässert werden. Flächige Gewässer sind hingegen nur selten zu finden (Wiegand et al. 2017). Feuchte Grabenränder stellen heute Rückzugsgebiete für Tier- und Pflanzenarten dar, die früher auf ausgedehnten Feuchtgrünländern verbreitet waren. Größere Wiesenvogelvorkommen fehlen in den stark nutzungsintensivierten Grünlandbereichen (BfN 2012c).

Der Anteil der Siedlungs- und Verkehrsflächen ist mit knapp 18 % für einen ländlichen Raum eher hoch. Gehölze finden sich hingegen nur entlang von Straßen und zum Windschutz für die Siedlungen. Charakteristisch für die Landschaft ist die intensive, landschaftsprägende Windenergienutzung (Wiegand et al. 2017). Die Küstenregion wird zudem stark touristisch genutzt.

Die an das niedersächsische Wattenmeer angrenzenden, intensiv genutzten Marschen werden von den im Wattenmeer rastenden Vögeln aufgesucht. Der Schutzgebietsanteil in dieser Landschaft liegt aufgrund der Vogelschutzgebiete bei 22,5 % der Gesamtfläche.

In den Ostfriesischen Seemarschen wurde eine Fläche nördlich von Emden als Beispielfläche ausgewählt und fotografiert.





Abb. 39: Beispielfläche zur Visualisierung von PV-FFA in den Ostfriesischen Seemarschen (Punkt und Pfeil geben Standort und Blickrichtung des Fotografen an) (Lenné3D GmbH 2020)

7.3 Umsetzung der Visualisierungen

Die Visualisierungen in den sehr verschiedenartigen Landschaften zeigen die große Bandbreite der Solartechnologie auf und welche Faktoren bei der Integration in die Kulturlandschaft zu beachten sind.

In den eher kleinteiligen Flächen der Zevener Geest mit Strukturen wie Hecken und Feldgehölzen sind niedrige Modulvarianten leicht in bestehende Kulturlandschaft integrierbar. Hier sind blaue und reflektierende Module weniger weit sichtbar und die Veränderungen für Erholungssuchende weniger spürbar. Die Visualisierung der APV-Anlage Heggelbach zeigt allerdings, dass die große Höhe der Aufständerung eine deutlich andere Präsenz und Wirkung auf die Erholungssuchenden haben würde (vgl. Abb. 40).





Abb. 40: Visualisierung von PV-FFA in der Zevener Geest. Links: Referenzanlage ohne Zaun; rechts: APV-Typ "Heggelbach" (Lenné3D GmbH 2020)

Die Landschaft im Bersenbrücker Land ist durch deutlich größere Schläge gekennzeichnet, auf denen PV-FFA eine größere Veränderung im Landschaftsbild hervorrufen würden (vgl. Abb. 41).





Abb. 41: Visualisierung von PV-FFA im Bersenbrücker Land. Links: Variante "winterertragsoptimiert"; rechts: APV-Typ "Heggelbach" (Lenné3D GmbH 2020)

Im hügeligen Innerstebergland hingegen sind PV-FFA in Hanglage weithin sichtbar (vgl. Abb. 42). Ob dies in der Bevölkerung als störend empfunden wird oder die Photovoltaik als positive Zukunftstechnologie akzeptiert wird, muss Teil weiterer Untersuchungen sein.





Abb. 42: Visualisierung von PV-FFA im Innerstebergland. Links: Referenzanlage blaue Module; rechts: Referenzanlage grüne Module (Lenné3D GmbH 2020)

Das Landschaftsbild der Ostfriesischen Seemarschen ist von großer Weite und wenig Strukturreichtum geprägt. Die Eingliederung einer PV-FFA stellt damit eine größere Herausforderung dar, da z. B. bereits die bisher übliche Anpflanzung mit Sichtschutzhecken das ortsübliche Bild stark verändern würde (vgl. Abb. 43).







Abb. 43: Visualisierung von PV-FFA in den Ostfriesischen Seemarschen. Oben links: Referenzanlage; rechts: Variante "winterertragsoptimiert"; unten: APV-Typ "Heggelbach" (Lenné3D GmbH 2020)

Die Visualisierungen der unterschiedlichen Anlagenvarianten machen deutlich, dass die Auswirkungen von PV-FFA auf das Landschaftsbild je nach Anlagendesign unterschiedlich und nicht pauschal zu bewerten sind. Auch die Sensibilität der niedersächsischen Landschaftstypen gegenüber PV-FFA und entsprechende Lösungsansätze für eine landschaftsverträgliche Integration bedürfen weiterer Untersuchungen. Gleichzeitig konnte auch die hohe Anpassungsfähigkeit der PV-Technologie demonstriert werden. Ob dieser Sachverhalt unter anderen zu einer erfolgreichen Integration in die niedersächsische Energielandschaft beitragen kann, wird im nächsten Kapitel im Gespräch mit Akteuren aus Regional- und Kommunalplanung diskutiert.

8 Steuerungspotenziale für den Ausbau der PV-Freiflächenanlagen auf regionaler Ebene

Den hohen Akzeptanzwerten der Solarenergie in ganz Deutschland (Elsner et al. 2015) stehen im ländlichen Raum teilweise Sorgen von Landbesitzern und Umweltschützern gegenüber (z. B. Pachtpreise, Artenschutz). Um Möglichkeiten für den im Energieszenario 2050 notwendigen Ausbau der EE zu schaffen ist es wichtig, die Bedenken der Akteure ernst zu nehmen und die die Akzeptanz von Solarenergie beeinflussenden gesellschaftlichen Prozesse wissenschaftlich zu betrachten.

Dabei steht die Regionalplanung im Sinne "einer nachhaltigen Raumentwicklung" (§1 Abs. 2 ROG) als Schlüsselakteur des dezentralen Ausbaus im Fokus der Untersuchung. Dies ist einerseits in ihrem überörtlichen und überfachlichen Charakter und dem damit verbundenen regionalspezifischen Wissensund Informationsstand begründet. Andererseits leitet sich ihre Bedeutung für die Energiewende aus ihren Kernaufgaben ab; so hat sie "eine *Ordnungsfunktion*, über die sie eine konfliktfreie Nutzung der knappen Flächen nach Zielen des gesellschaftlichen Gemeinwohls regelt, und eine *Entwicklungsfunktion*, über welche sie die Wirtschaft und Lebensqualität von Regionen fördern soll" (Fürst 2003). Vor dem Hintergrund des vergleichsweise geringen Ausbaus von PV-FFA in Niedersachsen sollte jedoch geklärt werden, inwieweit derzeit die Regionalplanung den Ausbau der PV-FFA steuern sollte. Gleichzeitig stellt sich auf kommunaler Ebene die Frage, ob die zur Verfügung stehenden Instrumente der Bauleitplanung für eine räumlich nachhaltige Steuerung ausreichen.

Dieses Kapitel soll einen ersten Einblick in die gegenwärtige Rolle von PV-FFA im regionalen Ausbau der EE in Niedersachsen geben. Hierzu wurden Gespräche in Form von Expertiseinterviews mit Akteuren aus Regional- und Kommunalplanung geführt, die sich mit dem Themenfeld Freiflächenphotovoltaik befassen. Die Interviews sind als Vorstudie für die Bestimmung von Steuerungspotenzialen des Ausbaus der Freiflächen-Photovoltaik auf regionaler Ebene in Niedersachsen zu verstehen. Im Rahmen theoretischer Vorüberlegungen (Literaturrecherche, Gespräche mit Akteuren) wurden vier für die Freiflächenphotovoltaik in Niedersachsen relevante Themenbereiche herausgearbeitet und als Leitfragen formuliert:

- 1. Wird in der regionalen Zusammenarbeit zwischen Region und Kommunen auf den Ausbau von Freiflächen-Photovoltaik eingegangen?
- 2. Gibt es Konflikte bei der Planung und Umsetzung von PV-FFA, die den Ausbau hemmen?
- 3. Wie werden formelle und informelle Planungsinstrumente eingesetzt?
- 4. Welche Synergien entstehen durch die technische Anpassung von Solarparks?

Die Antworten der Interviewpartner auf diese vier Leitfragen werden in den folgenden Unterkapiteln als vier gleichlautende Themenblöcke vorgestellt. Es wurden insgesamt sieben Interviews durchgeführt. Zur Wahrung der Anonymität werden die Namen der Interviewteilnehmer sowie der Landkreise und Gemeinden im Bericht nicht erwähnt. Es wurden Vertreter aus drei Landkreisen sowie vier Gemeinden befragt. Zu zwei Landkreisen konnte jeweils eine zugehörige Gemeinde für ein Interview befragt werden. Dabei lagen die Gemeindegrößen zwischen 8.300 bis 24.000 Einwohnern bzw. 43 bis 190 km². Die Kreisgrößen lagen zwischen 48.000 bis 360.000 Einwohnern bzw. 1200 bis 2300 km². Die geringe Anzahl der durchgeführten Interviews hängt mit vielen Absagen bei Interviewanfragen zusammen. Dies ist vermutlich auf den zeitgleichen Ausbruch des Covid-19-Virus zurückzuführen.

Bei der Auswahl der Interviewpartner wurde versucht, Landkreise bzw. Kommunen auszuwählen, in denen bereits PV-FFA errichtet wurden oder in denen auf Basis der Raumwiderstandsanalyse aus Kapitel 5 verhältnismäßig viele oder verhältnismäßig wenige Potenzialflächen für PV-FFA vorliegen. Das gelang nicht ganz, aber zumindest wurde durch die unterschiedlichen Ausgangssituationen

hinsichtlich der Erfahrungen im PV-Ausbau sowie des vorliegenden Flächenpotenzials ein vielfältiges Meinungsbild dargestellt.

In Kapitel 8.4 wird thematisch auf die technische Anpassungsfähigkeit von PV-FFA eingegangen und mit den Interviewpartnern diskutiert. Dazu wurden die im vorangegangenen Kapitel vorgestellten Anlagenvisualisierungen sowie Fotos verwendet.

8.1 Wird in der regionalen Zusammenarbeit zwischen Region und Kommunen auf den Ausbau von Freiflächen-Photovoltaik eingegangen?

Das Zusammenspiel der regionalen und lokalen Planungsebene ist für eine nachhaltige räumliche Steuerung des Ausbaus von PV-FFA von erheblicher Bedeutung.

Essenzen

"Im Großen und Ganzen würde ich eher sagen [spielen PV-FFA] eine untergeordnete Rolle."

"Es tut sich was, aber es ist sehr untergeordnet."

Egal, ob zwei Anlagen im Kreisgebiet, keine Anlagen im gesamten Kreis bis hin zu fünf Anlagen in einer Gemeinde: die Rolle von PV-FFA in den befragten Kommunen und Kreisen wird durch die Bank als untergeordnet eingeschätzt. Bei der Frage nach Erfahrungen mit PV-FFA gingen die befragten Personen vor allem auf ihre Rolle als Genehmigungsbehörde ein. Bemühungen beim Ausbau von PV-FFA gingen oft von einzelnen Privatpersonen aus, Anfragen an Kreise zu möglichen Standorten, Genehmigungsfragen aber auch planerische Beratungen von Gemeinden kamen sporadisch. Eine Zusammenarbeit zwischen Kreisen und Gemeinden über den Rahmen der formellen Beteiligungsformen bei Bauvorhaben hinaus existiert bislang nicht. Entsprechend der momentan untergeordneten Rolle von PV-FFA im Energieausbau sehen weder Kreise noch Gemeinden Verbesserungsbedarf in der Zusammenarbeit an diesem Thema. Hier wurde auf schon bestehende Strukturen verwiesen, die genutzt werden können, wie z. B. bestehende Kommunikationswege beteiligter Akteure durch andere Vorhaben aber auch der Verweis an die Klimaschutzagenturen oder leitstellen der Kreise.

8.2 Gibt es Konflikte bei der Planung und Umsetzung von PV-FFA, die den Ausbau hemmen?

Um einen effektiven und effizienten Ausbau der Solarenergie zu gewährleisten, müssen eventuelle Konflikte frühzeitig erkannt und gelöst werden. Eine systematische Auseinandersetzung mit auftretenden Konflikten kann einen wesentlichen Beitrag zur Akzeptanzförderung und Konfliktminimierung leisten.

Essenzen

"Das große Thema hier sind die Flächenversiegelung und der Flächenverbrauch, der Entzug landwirtschaftlicher Flächen. Und das wird in Niedersachsen bzw. unserer Region nicht so gut angesehen."

"Da wir es kaum haben, ist es bisher für den Bereich noch nicht so richtig wahrnehmbar. Es ist unterschwellig, bisher kaum bemerkbar. Aber wahrscheinlich, weil es einfach noch nicht so etabliert ist."

"Dem hat es scheinbar die Aussicht verbaut, das gleiche Thema, wie bei jeder baulichen Entwicklung über den Ortsrand hinaus, irgendeiner stört sich immer daran."

"Es gibt natürlich da auch Fragestellungen, die man klären müsste, in wie weit diese FFPV-Anlagen wirklich das Optimum an Flächenausnutzung darstellen."

"Wenn PV in die Fläche gehen muss, dann wird es dort starke Konkurrenz geben."

"Wir hatten hier auch schon einmal darüber nachgedacht, ob man mal anstößt, diese Festlegungen wo bei uns PV geht und wo nicht im Regionalplan halt zu überarbeiten, weil man durch einfach nur sagen 'auf Vorbehalt Landwirtschaft geht es nicht' halt auch teilweise Flächen sperrt, die zwar nach fachlichen Kriterien für die Landwirtschaft festgelegt wurden. Aber es gibt ja z. B. auch Bereiche entlang von Infrastrukturtrassen, die gut geeignet wären und vielleicht besser geeignet wären, als für die Nutzung als Landwirtschaft."

"Bei einer Vorbelastung der Flächen wie Schienenverkehr, Straßen vielleicht im Wesentlichen ja, bei solchen Dingen könnte Bereitschaft bestehen, sich auch weiterhin auf so etwas einzulassen. Aber so ganz generell, wenn das überhandnähme, würde das sicherlich kritisch."

Aufgrund der eher geringen Erfahrungen in der Planung und Umsetzung von PV-FFA (im Schnitt haben die befragten Personen in den Gemeinden und Landkreisen zwei PV-FFA-Projekte planerisch begleitet) scheinen Konflikte kaum aufzutreten bzw. wurden von den befragten Personen nicht wahrgenommen. Es wurde von einem Fall berichtet, bei dem sich ein Anwohner während der Planungsphase einer Anlage bei der Gemeinde beschwert habe, dass die Anlage seine Aussicht verbaue. Dies sei aber laut der befragten Person nicht unüblich, in der Regel werde in der Gemeinde jede bauliche Entwicklung über den Ortsrand hinaus von Anwohnenden kritisch betrachtet. Eine andere befragte Person berichtete von auftretenden Konflikten innerhalb eines Planungsverfahrens in den Bereichen Naturschutz und Landschaftsbild aufgrund der exponierten Lage des Standortes. Da sich das Projekt aber noch in einer sehr frühen Phase der Planung befinde, könne hier nicht von einem offen auftretenden Konflikt gesprochen werden. In einem weiteren Beispiel waren sich Kommune und Vorhabenträger uneinig über die umzusetzende Größe der Anlage. Inwieweit dies zu einem substanziellen Konflikt führt, bleibt fraglich.

Gleichzeitig nannten die befragten Personen eine Reihe von ihrer Meinung nach möglichen Konflikten, die bei einem weiteren Ausbau der PV-FFA auftreten könnten. Hierbei wurde auf unterschiedliche Probleme mit der landwirtschaftlichen Nutzung verwiesen. So könne es beim Ausbau zu Einschränkungen durch die Vorgaben des Landesraumordnungsprogrammes (LROP) kommen, welches die durch die Regionalplanung festgelegten Vorbehaltsgebiete Landwirtschaft als Flächen für PV-FFA ausschließe. Außerdem würden durch PV-FFA belegte Flächen der Landwirtschaft entzogen, welches den ohnehin schon hohen Flächendruck für Landwirte, auch durch die neue Düngeverordnung, zusätzlich erhöhe. Insgesamt wurden viele Konflikte darauf zurückgeführt, dass PV-FFA zu Flächenversiegelung und unnötigem Flächenverbrauch führen. Entsprechend wurden in diesem Zusammenhang auch die größten Hürden für einen weiteren Ausbau gesehen. Barrieren, die einen weiteren Ausbau der PV-FFA hemmen sehen viele der befragten Personen auch im Zusammenhang mit der Landwirtschaft. Hier sei von einer Flächenkonkurrenz auszugehen, einerseits aufgrund der Vorgaben im LROP, andererseits durch eine ohnehin schon existierende allgemeine Flächenknappheit. So sei es mittlerweile für viele Gemeinden schon schwer, Kompensationsflächen im eigenen Gemeindegebiet zu finden. Landwirte gäben ihre Flächen ebenfalls ungern für andere Nutzungen auf

und in einer Region sei die Flächenverfügbarkeit aufgrund des hohen Anteils an Naturschutzflächen grundsätzlich nicht gegeben.

Ein weiteres Hemmnis seien die Vorgaben durch das EEG und nicht mehr attraktive Förderkulissen von PV-FFA. Hemmend könne ebenfalls die Akzeptanz von PV-FFA auf nicht vorbelasteten Flächen sein. Dabei wurden als Gründe die Einfügung in das Landschaftsbild bzw. die Angst vor einem ungesteuerten Ausbau und damit verbundene "Landschaftsverschandelung" erwähnt. Ein weiterer Konflikt wurde bei Anwohnern vermutet, die sich durch den Bau einer Anlage beeinträchtigt fühlen könnten. Auch dieser Punkt wurde von allen Befragten genannt. Weitere Konflikte seien im Zusammenhang mit historischen Kulturlandschaften und dem Denkmalschutz möglich.

Auffällig bei den Antworten war, dass mitunter großes Unwissen über die Auswirkungen von PV-FFA auf die Umwelt herrscht und den Anlagen eher negative Effekte zugesprochen wurden. So wurde von sehr hohen Versiegelungsgraden der Flächen bis hin zu geschottertem Untergrund gesprochen und die Anlagen als nicht artenfördernd eingestuft. Auch die Einzäunungen wurden als unüberwindbare Barriere für Säugetiere angesehen.

Wünsche an die Regionalplanung respektive die Kommunen bezüglich des Konfliktmanagements gab es wenig. Es wurde auf die Notwendigkeit frühzeitiger Kommunikation bei der Planung von Vorhaben hingewiesen. Eine Person erwähnte, dass eine Orientierungshilfe von der Regionalplanung z. B. zu geeigneten Flächen für PV-FFA hilfreich sei.

8.3 Wie werden formelle und informelle Planungsinstrumente eingesetzt?

Beim Umgang mit PV-FFA aus Sicht der Raumplanung gibt es einen gewissen Spielraum, was den Einsatz von formellen und informellen Planungsinstrumenten angeht. Als formelle Instrumente der Regional- und Kommunalplanung werden hier die Rechts- und Planinstrumente verstanden, die sich aus dem Bau- und Raumordnungsgesetz ableiten: dazu gehören neben den Raumordnungsplänen auf Landes- und Regionsebene die vorbereitenden und verbindlichen Bauleitpläne auf kommunaler Ebene (Diller 2018). Keine rechtliche, jedoch eine gewisse politische Bindungswirkung haben hingegen informelle Planungsinstrumente, wie z.B. regionale Entwicklungskonzepte, Stadtentwicklungskonzepte und städtebauliche Rahmenpläne sowie auch sektorale Entwicklungskonzepte wie Energiekonzepte (ebd.). Diese Energiekonzepte werden auch im LROP gefordert (LROP 4.2, 13, Satz 3): "Zur Verbesserung der Standortentscheidungen für die in Satz 1 genannten Anlagen sollen die Träger der Regionalplanung im Benehmen mit den Gemeinden regionale Energiekonzepte erstellen und in die Regionalen Raumordnungsprogramme integrieren." Recherchen zu bestehenden Energiekonzepten in den Kreisen Niedersachsens ergaben ein eher durchwachsenes Bild, bei dem Standortfragen bzw. PV-FFA als überhaupt erwähntes Thema nur selten aufkamen. Daraus erwächst auch die Frage, auf welcher Ebene die planerische Verantwortung für den PV-FFA-Ausbau liegen soll.

Essenzen

Befragte Personen der Regionalplanung:

"Wichtige Aufgabe einer Region: sowas vorzubereiten und auch grundsätzlich zu steuern. Eine der, aus meiner Sicht, wichtigsten Herausforderungen auch von Regionalentwicklung."

"Es gibt eben sehr unterschiedliche Regionen, sehr unterschiedliche Flächenansprüche und auch die Landschaftsräume sind sehr unterschiedlich, das kann man nicht über so pauschale Zahlen abbilden." "Also ich bin der Auffassung, dass wenn das Land erstmal mit Best-Practice-Beispielen und einem Leitfaden - es gibt ja genügend Leitfäden und Möglichkeiten für die Umsetzung von Freiflächenphotovoltaik - aktuelle, gute Beispiele oder Lösungsmöglichkeiten gibt, dass die hilfreicher sind, als irgendwelche Richtzahlen oder irgendwelche anderen Dinge."

"Ich kann mir gerade keine [Kriterien] vorstellen, die planerisch umsetzbar wären. Was sollten die Kriterien sein, um festzulegen, welcher Landkreis oder welche Kommune wie viel PV ausbauen sollte?"

"Die ganze Entwicklung der Windenergiebranche hätte es nicht gegeben, wenn es nicht die Zuschüsse gegeben hätte. Da hätte niemand, auch die LK nicht, was gemacht. Nur weil der Druck dann groß war, musste ja geplant werden. Weil dann die LK sagen das können wir nicht mehr abfedern, das müssen wir jetzt steuern."

Befragte Personen der Kommunalplanung:

"Wenn es auch hier zu Konflikten mit der Bevölkerung kommt, ist eine regionale Steuerung (regionale Vorgaben, Ziele und abgeleitete Beiträge) für Kommunen einfacher umzusetzen."

"Als Gemeinde werden wir natürlich auch nur auf Anfrage aktiv. Wir sind eine kleine Kommune und reagieren nur. Ich bin die einzige Bearbeiterin im Bereich Bauleitplanung."

"Es braucht einen, der vordenkt und vorlebt und die anderen immer wieder versucht unterzuhaken, mitzunehmen. Das ist dann eigentlich eine Aufgabe der Region."

Beim Ausbau der erneuerbaren Energien in Niedersachsen haben 7 der 8 Befragten den Landkreisen eine verantwortliche Rolle zugeschrieben. Es gab zwar auch die Ansicht, dass die Kreise nur eine begleitende Rolle spielen könnten, nicht offensiv Flächen für PV-FFA planen könnten und hier Vorgaben von Landes- und Bundesebene gefragt seien. Die Mehrheit (ebenfalls sieben von acht befragten Personen) war jedoch der Meinung, der EE-Ausbau könne nicht über Landes- und Bundesebene erfolgen, sondern die zentrale Rolle spielten hier Regionen und Kommunen. Die Kreise seien dafür zuständig, sich an die "Spitze der Bewegung zu setzen" und das Thema Energiewende "auf oberer Ebene zu spielen, dass das auch nach unten hin ankommt". Sie sollten hier als Schrittmacher auftreten und als Ebene, "die vordenkt und vorlebt und die Anderen immer wieder versucht unterzuhaken, mitzunehmen". Dies sei die eigentliche Aufgabe einer Region.

Für Gemeinden sei es wichtig, dass etwaige Konflikte schon auf Ebene der Regionalplanung behandelt werden, auch dass dort großräumig Potenziale analysiert und Ziele klar definiert würden. Damit sei die Vorbereitung und Steuerung des EE-Ausbaus Rolle der Kreise. Hierzu gehöre zum einen die Erstellung von Potenzialstudien, durch die ein ausgeglichener Energiemix für die Gemeinden ermöglicht würde. Dies wurde auch von einem der Kreise durchgeführt und an die Gemeinden kommuniziert. Aber auch die Aufklärung und Information der Bevölkerung über den EE-Ausbau sei Teil dieser Rolle.

Das Ausmaß der regionalen Steuerung hänge jedoch auch davon ab, inwieweit es überhaupt zu Konflikten, bspw. innerhalb der Bevölkerung, beim Ausbau der EE käme.

Die Frage, wonach festgelegt werden sollte, welchen mengenmäßigen Anteil jeder Landkreis am Ausbauziel des Landes Niedersachsen trägt, wurde kritisch diskutiert. Einerseits könne es eine Steuerung "von oben" den Kommunen erleichtern aktiv zu werden, zumal diese selbst keine Potenzialanalysen durchführen könnten. Würde dies von jeder Kommune eigenständig gemacht, führe dies zu Kirchturmdenken und kurzsichtiger Planung.

Andererseits wurde, vor allem von den Vertretern der Regionalplanung, eine Vorgabe von Landesebene aus verschiedenen Gründen abgelehnt. So seien die Regionen in ihren Strukturen und standörtlichen Gegebenheiten zu unterschiedlich, um diese Differenzen über Zahlen abbilden zu können. Richtwerte

seien nicht hilfreich, da sie mit der Dynamik in der Entwicklung der EE nicht mitkäme und die damit verbundene Pauschalität nicht der Realität entspräche. Auch prozentuale Vorgaben als Ausbauziel für Kreise seien nicht hilfreich. Als Negativbeispiel wurde dreimal der Windenergie-Erlass genannt und als Begründung dafür genommen, dass eine faire, objektive mengenmäßige Vorgabe durch die Raumordnung auf Landesebene nicht möglich sei. Es sei gut, wenn "das Land vorwegläuft und ein Ziel formuliert, aber die Umsetzung vor Ort ist problematisch: dem Bürger ist es egal, was das Land sagt und was wo dahintersteht."

Alternativ wurden kreative Lösungsansätze von Landesebene gefordert. So z. B. Best-Practice-Beispiele und ein Leitfaden sowie finanzielle Anreize im Rahmen des EEG und Aufklärung in Form von Hinweisen und Broschüren. Auch ein Informationssystem ähnlich eines Solardachkatasters wurde angeregt.

Auf die Fragen nach Existenz und Effektivität regionaler Gesamtkonzepte zum nachhaltigen, natur- und raumverträglichen Ausbau erneuerbarer Energien gingen die Antworten weit auseinander. So wurden mitunter bestehende Klimaschutzkonzepte, Masterpläne Klimaschutz, Teilkonzepte oder auch der Regionalplan selbst als Konzept genannt. Die Hälfte der Befragten war jedoch der Ansicht, dass diese nicht als Gesamtkonzept im Sinne eines natur- und raumverträglichen Ausbaus zu verstehen seien. Hinzu käme, dass in diesen Konzepten in den seltensten Fällen PV-FFA ein Thema seien. Oft wurde bei dieser Frage auch auf die regionalen Klimaschutzagenturen verwiesen.

Ein Befragter war der Auffassung, dass es nicht Aufgabe der Planung sei, Energieversorgung in der Region zu planen und es entsprechend auch nicht das Know-how und die Wirkungsmechanismen gäbe, um dies zu regeln.

Die Effektivität der jeweiligen Konzepte erschien ebenfalls unklar. Bei vielen Konzepten sei es nicht nachvollziehbar, ob deren Umsetzung zu einem beschleunigten Ausbau erneuerbarer Energien führe. So könne bspw. nicht beeinflusst werden, ob tatsächlich Investoren in Region oder Kommune Vorhaben umsetzten. Zwei Befragte waren der Auffassung, dass durch die Bereitstellung und Ausweisung von Flächen auch Investoren gekommen seien und die Umsetzung einzelner im Konzept enthaltener Maßnahmen in direktem Zusammenhang mit einem beschleunigten EE-Ausbau stünde.

Eine Kopplung der bestehenden Konzepte mit der Regionalplanung gäbe es in den meisten Fällen nicht. Offizielle Schnittstellen seien nicht vorhanden, ein Befragter nannte den Austausch innerhalb eines Energiearbeitskreises der Region als Verzahnungspunkt.

Als sinnvolles informelles Planungsinstrument für eine erfolgreiche Zusammenarbeit von Regionen und Kommunen im EE-Ausbau wurde an erster Stelle der regelmäßige Austausch genannt. Dazu gehöre der Aufbau von fachlichen Netzwerken, Workshops für planende Personen und vor allem der persönliche Kontakt. Gerade die Abstimmung und Kommunikation zwischen Kreis und Kommune sei essenziell. Kreise sollten beim EE-Ausbau auf die Mitnahme der Gemeinden bedacht sein und es vermeiden, Probleme nur von einer fachlichen Seite aus anzugehen. Denn oft seien gerade kleine Gemeinden schon mit dem Alltagsgeschäft ausgelastet und kämen gerade ihren gesetzlichen Verpflichtungen nach. Wichtig sei daher auch die Schulung von Fachpersonal in den Gemeinden sowie die Öffentlichkeitsaufklärung der Bevölkerung. Die Arbeit der Klimaschutzagenturen und Beratungsangebote für kleinere Gemeinden seien ebenfalls sehr hilfreich.

Es wurde auch nochmals erwähnt, dass eine allgemeine Zielformulierung für die Region notwendig sei, auch um zu sehen, wie man einen Beitrag zum Gesamtziel leisten kann. Entsprechend wurde auch die Erstellung von Klimaschutzkonzepten genannt.

In Bezug auf formelle Planungsinstrumente sei die Bauleitplanung gut geeignet für die Steuerung von PV-FFA. Eine weitere Möglichkeit sei es, das Thema Solarenergie bzw. PV-FFA gesondert im Regionalplan zu behandeln und diesem so einen gewissen Stellenwert mit rechtlicher Verbindlichkeit zuzugestehen. Aber auch einfach umzusetzende Maßnahmen mit Öffentlichkeitswirksamkeit seien

sinnvoll, denn "es ist nach außen auch immer besser, wenn man eine Erfolgsstory hat und sagen kann "wir können das erreichen", da kriegt man mehr mit ins Boot".

8.4 Welche Synergien entstehen durch die technische Anpassung von Solarparks?

Der letzte Teil des Interviews behandelte die Ausgestaltung von PV-FFA. Hier wurden ausgewählte Anlagenvarianten aus Kapitel 7 gezeigt und die möglichen ökologischen, sozialen und ökonomischen Vor- und Nachteile erklärt. Auf die Frage, welche Gestaltungsmöglichkeiten sinnvoll seien, um Konflikte im Bereich Landschaftsbild, Naturschutz und Erholung zu vermeiden, wurden viele Aspekte genannt, die auch in INSIDE schon aufgegriffen wurden. So sei die Farbgestaltung der Module, ihre Reflexion und Neigung relevant, ebenso die Licht- und Wasserdurchlässigkeit der Module sowie ihr Abstand zum Boden und mögliche Auswirkungen auf die Vogelwelt. Auch Eingrünungsmaßnahmen und Abpflanzungen um die PV-FFA könnten Konflikte mit dem Landschaftsbild vermeiden. So sei es für Anwohnende relevant "weit gucken zu können" oder am besten ästhetisch Beeinträchtigendes gar nicht erst zu sehen. Aber auch hier gingen bei aktuellen Planungen die Meinungen auseinander, wie hoch beispielsweise eine Hecke um eine geplante Anlage zu sein habe. So spiele das Relief, Sichtachsen und mögliche Sichtverschattungen ebenfalls eine Rolle. Grundsätzlich seien solche Aspekte jedoch gut über Festsetzungen in der Bauleitplanung steuerbar.

Bei der Diskussion der erstellten Anlagenvarianten wurden vor allem die grün eingefärbten Module (vgl. Kap. 7) bei sieben von acht befragten Personen positiv bewertet. Diese könnten zu höherer Akzeptanz in der Bevölkerung führen und es füge sich von weitem gut in die Landschaft ein. Die Frage sei jedoch die technische und finanzielle Umsetzbarkeit.

Die APV-Anlage wurde hinsichtlich ihrer Doppelnutzung und des möglichen Zusatzertrages von der Hälfte der befragten Personen positiv bewertet. Bedenken kamen jedoch aufgrund ihrer Wirkung auf das Landschaftsbild.

Die Anlagenvariante mit senkrecht aufgestellten Modulen wurde von allen Befragten am ausgiebigsten diskutiert. Hier gingen die Meinungen zur Integration in die Landschaft weit auseinander: vier der befragten Personen sahen hier keine Probleme, während zwei der befragten Personen die zaunähnliche Nutzung eher als Sichtbarriere sahen. Den technischen Vorteil der Doppelnutzung und damit verbundenen Win-Win-Effekt konnten viele der Befragten wiederum nachvollziehen und teilen.

Vorläufiges Fazit

Mit der vorgestellten Befragung liegt ein erstes Stimmungsbild aus den Planungsbehörden in Niedersachsen vor, auch wenn nur wenige Interviews durchgeführt werden konnten. Es zeigt sich, dass die Zuständigkeiten und Verantwortlichkeiten beim Ausbau der Freiflächen-PV in Niedersachsen in der Praxis unklar sind. Nicht überall sieht die Regionalplanung diese Aufgabe bei sich und verweist auf die Klimaschutzagenturen, die wiederum nicht die Kompetenzen haben, die planerischen Fragestellungen mit zu bearbeiten. Ein pro-aktiver Umgang von Seiten der Regionalplanung wird kaum als notwendig erachtet. Dies führt insgesamt zu wenig Dynamik beim weiteren Ausbau der Energiewende, wenn nicht einzelne engagierte Personen den Umsetzungsprozess für einzelne Projekte in die Hand nehmen.

Die Bedeutung von landesweiten Vorgaben für den Ausbau der EE in den einzelnen Regionen oder Kommunen wird von den Befragten nicht eindeutig positiv bewertet. Trotzdem bleibt aber der Wunsch nach einer übergeordneten Instanz, die die finanziellen Mittel und das fachliche Know-how hat, die unteren Ebenen zu unterstützen.

Durch die rege Diskussion der visualisierten Anlagenvarianten in den unterschiedlichen Landschaftskontexten wurde das Potenzial deutlich, welches die technische Anpassungsfähigkeit der

PV-Technik birgt. Dieses sollte mit Hinblick auf mögliche Akzeptanzsteigerung von PV-FFA weiter untersucht werden.

9 Das Projekt INSIDE im Kontext der niedersächsischen Energiewende

9.1 Generelle Erkenntnisse aus dem Forschungsprojekt

9.1.1 Handlungsbedarf

Ohne deutlich mehr Solarenergienutzung wird Niedersachsen seine Ziele für Strom aus erneuerbaren Energien nicht erreichen. Sowohl die installierte Gesamtleistung als auch der jährliche Zubau müssen in den nächsten Jahren deutlich ausgebaut werden. Den solaren Freiflächen kommt dabei eine wichtige Rolle zu, denn sie können einerseits besonders kostengünstig nachhaltigen Strom produzieren, und andererseits können über Freiflächenanlagen vergleichsweise schnell nennenswerte Erzeugungskapazitäten aufgebaut werden.

Die derzeitigen niedersächsischen Regelungen zur Raumordnung, die darauf abzielen erst einmal andere Potentiale als die Freifläche zu nutzen, greifen zu kurz. Zum einen hat sich die Erschließung dieser Potentiale in 20 Jahren EEG-Förderung als sehr mühsam herausgestellt. Zum anderen zeigt der Blick in die Zukunft, dass die Dach- und Gebäudeflächen in Niedersachsen inklusive sonstiger Potentiale an Verkehrswegen und auf baulichen Anlagen nicht ausreichen werden, um den prognostizierten Bedarf an grüner Energie, der zur Einhaltung der Klimaziele notwendig ist, zu decken. Daher ist es wichtig, sowohl Dach- als auch Freiflächenpotentiale in Niedersachsen für die Solarenergienutzung zu erschließen.

9.1.2 Flächenertrag / Effizienz der PV-FFA

Die Ergebnisse im Kapitel 2 zeigen, dass nach dem gegenwärtigen (2020) Stand der Technik gebaute PV-FFA einen deutlich höheren Flächenertrag haben als die meisten Solarparks des Bestands. Im heute gängigen Anlagendesign (entspricht der Referenzanlage in Kap. 2) liegt der Flächenbedarf pro Leistung bei 1 ha/MW und der jährliche Stromertrag pro Fläche am Standort Niedersachsen bei 1,09 GWh/ha. Wenn das Anlagendesign auf Flächeneffizienz optimiert wird (ertragsoptimierte Anlage in Kap. 2), sinkt der Flächenbedarf weiter auf 0,66 ha/MW und der jährliche Stromertrag steigt auf 1,45 GWh/ha.

Diese aktuellen Entwicklungen in der Flächeneffizienz von PV werden in vielen Studien nicht ausreichend berücksichtigt. Da die Potenziale für PV-FFA in der Regel aus der Kombination von verfügbaren Flächen und zu erwartenden Flächenerträgen ermittelt werden, werden sie unterschätzt. Ein prominentes Beispiel ist die dena-Leitstudie (Kruse et al. 2018), die das Potential von PV auf der in der Studie angenommenen Flächenkulisse nur halb so hoch einschätzt, wie nach dem Stand der Technik zu erwarten wäre. Zudem sind zukünftig noch weitere innovative Lösungen zu erwarten, die die Flächennutzung noch effizienter gestalten werden.

Im Vergleich zur Flächeninanspruchnahme durch Energiepflanzenanbau sind PV-FFA erheblich flächensparender und bei Flächenknappheit daher vorzugswürdig. Ihr energetischer Flächenertrag übersteigt den Energieertrag aus dem Energiepflanzenanbau um das 50–65-fache (vgl. Kap. 2). Trotzdem werden derzeit in Niedersachsen 267.000 ha für Energiepflanzenanbau genutzt (3N 2019) und nur 2.031 ha für PV-FFA (Bundesnetzagentur 2020). Die Analyse des RWS in Niedersachsen (Kap. 5) zeigt, dass die Potenziale einer mensch- und naturverträglichen Nutzung mit 563.279 ha (bezogen auf die Referenzanlage) sehr groß sind und deutliche Entwicklungsmöglichkeiten bestehen.

9.1.3 Wirtschaftlichkeit

PV-FFA zählen aktuell (2020) weltweit zu den konkurrenzfähigsten Kraftwerken im Neubau. Die spezifischen (also kapazitätsbezogenen) Investitionen liegen im Bereich von 700.000 €/MW für kleine Anlagen mit 0,75 MW Leistung und 500.000 €/MW für sehr große Anlagen mit 200 MW Leistung (Altmann, S. 2020). Mit für Niedersachsen plausiblen Annahmen (siehe Kap. 2.2) sind damit Stromgestehungskosten von deutlich unter 50 €/MWh realistisch (42,34 €/MWh siehe Tab. 5). Auf absehbare Zeit ist mit weiter sinkenden Preisen für PV-Anlagen und damit auch für den damit erzeugten Strom zu rechnen.

Unter der Annahme, dass bei der Vermarktung des Stroms ein Preis von 50 €/MWh (5 Ct/kWh) erzielt werden kann, liegen die mit PV-FFA erreichbaren Erträge pro Hektar und Jahr bei ~54.000 € für eine Anlage mit dem heutigen (2020) Stand der Technik, und bei ~72.000 € für eine flächenertragsoptimierte Anlage.

Da bis Ende 2022 im Rahmen des Atomausstiegs und mit der ersten Stufe des Kohleausstiegs absehbar gut 11 GW an Grundlastkapazität aus dem Strommarkt gehen werden, erscheint dann ein Anstieg der Großhandelspreise für Strom realistisch, was auch von aktuellen (Juli 2020) Daten der EEX (EEX 2020) untermauert wird. Somit ist davon auszugehen, dass sich in absehbarer Zeit größere PV-FFA auch in Niedersachsen ohne Förderung allein am Strommarkt refinanzieren können und nicht mehr an EEG-Regularien gebunden sind. Zur Realisierung brauchen sie zusammenhängende Flächen, um in der notwendigen Größe (Skaleneffekte) entstehen zu können. Die aktuellen Zaheln der Bundesnetzagentur weisen darauf hin, dass Anlagen ab etwa 1-2 ha Anlagengröße bei Ausschreibungen im EEG konkurrenzfähig sind. Aktuelle Projekte außerhalb der EEG-Förderung werden derzeit wesentlich größer geplant, z.B. auf 50 ha in Wasbek (Schleswig-Holstein) oder auf 160 ha in Werneuchen (Brandenburg).

Daher muss der Ausbau von Freiflächen-PV auch auf zusammenhängenden Flächen ermöglicht und gleichzeitig mit den Belangen anderer Landnutzungsarten, insbesondere der Landwirtschaft und des Naturschutzes, in Einklang gebracht werden.

9.1.4 Auswirkungen von PV-FFA auf die Pachtpreise

Die möglichen Auswirkungen des Ausbaus von PV-FFA auf die Pachtpreise in Niedersachsen wurden in einem für das Projekt INSIDE beauftragten Gutachten untersucht (Hübner und Hardeweg 2020). Die Nutzung landwirtschaftlicher Flächen für PV-FFA wird darin als vergleichsweise sehr wettbewerbsfähige Alternative zur ackerbaulichen Nutzung verstanden, die das Pachtpreisniveau lokal steigen lassen kann. Analog zum Anbau von Energiepflanzen für die Biogasproduktion wird davon ausgegangen, dass die Flächen für PV-FFA oder APV-Anlagen für die Standzeit der PV-Installation teilweise oder vollständig einer ackerbaulichen Nutzung entzogen werden.

Dabei wurde die im Energieszenario Niedersachsen 2050 für den Runden Tisch Energiewende vorgeschlagene Inanspruchnahme von 116.670 ha landwirtschaftlicher Nutzfläche (Faulstich et al. 2016) für den Bau von PV-FFA als Berechnungsgrundlage verwendet. Ebenso wie bei Biogasanlagen wären Landkreise mit einer hohen Großviehdichte wesentlich stärker von Flächenkonkurrenzen und damit Pachtpreissteigerungen betroffen. Im Ergebnis wäre in diesen Regionen aufgrund der verstärkten Flächenkonkurrenz ein Anstieg der Pachtpreise bei Neuverträgen zwischen 3,8 und 14,8 % möglich (Hübner und Hardeweg 2020).

Zu beachten ist allerdings, dass das Energieszenario Niedersachsen 2050 aus dem Jahr 2016 stammt und bereits erreichte technologische Verbesserungen im Flächenbedarf von PV- und Windenergie-Anlagen noch nicht berücksichtigt sind. Nach dem aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik ist

für eine vollständig auf Erneuerbaren Energien basierende Energieversorgung eine deutlich geringere Flächeninanspruchnahme notwendig.

Hinzu kommt, dass PV-FFA auf nicht landwirtschaftlich genutzten Flächen in der Rechnung ebenso wenig betrachtet wurden wie ein möglicher Rückgang der Flächeninanspruchnahme für Energiepflanzenanbau zugunsten von Nahrungsmitteln. Es ist zu erwarten, dass ein Teil der Biogasanlagen stärker auf die Verwertung von Reststoffen umgestellt wird, so dass die bisherige Energiepflanzenanbaufläche zum Teil auch für PV zur Verfügung stehen wird.

Aufgrund dieser beiden Einschränkungen gehen wir davon aus, dass die Pachtpreise auch bei einer umfangreichen Nutzung von PV-FFA in Niedersachsen deutlich geringer ansteigen werden, als in (Hübner und Hardeweg 2020) für die Versorgung durch 100% EE abgeschätzt wurde.

9.1.5 Best-Practice-Beispiele für die Verknüpfung von PV-FFA und Naturschutz

Zu den Auswirkungen von PV-FFA auf Mensch und Umwelt wurde eine Literaturanalyse durchgeführt (vgl. Kap. 4). Diese können sowohl negativ als auch positiv sein und hängen in ihrer Intensität stark von Lage und Vornutzung der in Anspruch genommenen Flächen ab. Es existieren auch Beispielprojekte, in denen die Anlage eines Solarparks als eine Win-Win-Situation für erneuerbare Energien und Naturschutz gesehen werden kann.

So können PV-FFA bei entsprechendem Management gezielt mit dem Schutz der Biodiversität verknüpft werden (Niemann et al. 2019; Raab 2015). Gerade in ausgeräumten Landschaften bieten sie Rückzugsräume für Tier- und Pflanzenarten, die auf landwirtschaftlich intensiv genutzten Flächen keinen Lebensraum mehr vorfinden oder sie können als Trittsteinbiotope entlang von Verkehrswegen fungieren. Als Beispiel hierfür steht der Solarpark Frauendorf im Landkreis Spree-Neiße in Brandenburg. Auf dem ehemaligen Ackerstandort wurde mit regionalem Wildpflanzensaatgut ein Ansaatkonzept auf der Fläche umgesetzt und damit ein ökologischer Mehrwert zum Ausgangszustand geschaffen (Procon Solar GmbH 2020; Hering 2019). Zusätzliche Blüh- und Sichtschutzstreifen außerhalb der Fläche, eine Kooperation mit regionalen Imkern sowie ein angrenzender Aussichtshügel mit Schautafel, erhöhen die Akzeptanz vor Ort.

Einen Schritt weiter gedacht wurde dieser Ansatz bei einer PV-FFA in Hengelo. Im dortigen 7,1 ha großen Solarpark de Kwekerij wurde großer Wert auf landschaftliche Gestaltung und Erlebbarkeit gesetzt (solarpark de kwekerij 2020; B&W Energy GmbH & Co. KG 2016). Das Gelände ist tagsüber zugänglich und wurde in Form eines Landschaftsparks gestaltet, der zum Erholen und Spazieren einladen soll. Neben der Einbindung der Anwohner in die Projektplanung wurde der Solarpark auch mit Hinblick auf einen geringen ökologischen Fußabdruck zertifiziert. Eine extra eingerichtete Stiftung kümmert sich um die Instandhaltung des Landschaftsparks und organisiert Führungen und Veranstaltungen zum Thema Nachhaltigkeit.

Auch die Einbindung von Partnern vor Ort durch Fördervereine oder Patenschaften kann zur Sensibilisierung führen (UM BaWü 2019). Beim Solarpark Berghülen in Baden-Württemberg gab es anfänglich heftigen Widerstand aus der Bevölkerung (Graser-Kühnle 2017). Durch eine Kooperation der Landesstiftung Energie & Klimaschutz Baden-Württemberg sowie den beiden Bündnissen BUND Berghülen und dem NABU Baden-Württemberg wurden daraufhin ökologische Aufwertungsmaßnahmen umgesetzt, die weit über die gesetzlichen Anforderungen hinaus gingen (Stiftung Energie & Klimaschutz 2017). Neben der Anlage von Nisthilfen für Feldsperling und Wildbienen, der Pflanzung von Bäumen und Sträuchern wurden Kalksteinhaufen, Sandbunker und Totholzhaufen errichtet (UM BaWü 2019). Seitdem wird die Anlage als ökologisches Vorzeigeprojekt beworben (Graser-Kühnle 2017).

9.2 Empfehlungen an die verschiedenen Akteure des Ausbaus der PV-Freiflächenanlagen

Während der 22-monatigen Bearbeitungszeit des Projektes wurde der Ausbau der PV-FFA in Niedersachsen aus verschiedenen Blickwinkeln der beteiligten Disziplinen analysiert und modelliert. Dies erfolgte im engen Austausch mit den verschiedenen niedersächsischen Stakeholdern im Rahmen von Beiratssitzungen, Befragungen oder wissenschaftlichen Fachtagungen.

Die Analyse des Akteursnetzes (Kap. 8) zeigt die besondere Relevanz der Behörden des Landes Niedersachsen, insbesondere des Niedersächsischen Ministeriums für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU) und des Niedersächsischen Ministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML), als übergeordnete Entscheidungsebene für die Umsetzung der Energiewende in Niedersachsen. Die Umsetzung der Solar-Projekte vor Ort kann aber nur mit Unterstützung der regionalen/kommunalen Planungsträger erfolgen. Diese wiederum handeln in Kooperation mit den Betreibern und Projektierern aus der privaten Wirtschaft. Eine wichtige Voraussetzung für einen erfolgreichen Ausbau der PV-Nutzung ist die klare Kommunikation von Verantwortlichkeiten und Entwicklungszielen der einzelnen Ebenen, für die im Folgenden Empfehlungen formuliert werden.

9.2.1 Empfehlungen an das Land Niedersachsen

Empfehlung 1: Bekenntnis zur Photovoltaik als wichtigem Standbein der zukünftigen niedersächsischen Energieversorgung

Da die Absichten und Maßgaben der Landesregierung für das Verhalten anderer Akteure von großer Bedeutung sind (vgl. Kap. 8), empfehlen wir der Landesregierung ein klares Ziel für die Entwicklung der PV in Niedersachsen zu setzen. Eine entsprechende Formulierung könnte lauten:

Der Photovoltaik-Ausbau soll neben dem Ausbau der Windenergie in dem Umfang erreicht werden, wie er für eine vollständig auf Erneuerbaren Energien basierenden Energieversorgung notwendig und gleichzeitig mensch- und umweltschonend möglich ist. Dieses Ziel kann für Niedersachsen quantifiziert werden, indem eine Berechnung im Bundeskontext herangezogen wird. Diese ermittelt das nachhaltig erreichbare Mindestziel anhand bundesweit einheitlicher, transparenter Kriterien und unter Einbeziehung des nachhaltig aktivierbaren Windenergiepotentials. Damit wird deutlich, welche Verantwortung Niedersachsen für das Erreichen der nationalen Verpflichtungen im Zusammenhang mit dem Klimaabkommen von Paris zufällt (s. Walter et al 2017; Thiele et al. in Vorb.).

Durch einen Einsatz der Photovoltaik in hinreichendem Umfang lassen sich gleichzeitig mehrere gesellschaftliche Ziele wie Klimaschutz, Resilienz der Energieversorgung, regionale & lokale Wertschöpfung, Teilhabe der Bevölkerung, Arten- und Naturschutz realisieren. Das wird in diesem Gutachten deutlich und sollte in künftigen Forschungsarbeiten weiter untersucht werden.

Empfehlung 2: Anpassung von Regelungen im LROP, um genügend mensch- und naturverträglich nutzbare Flächen für PV-FFA verfügbar zu machen

Dazu soll eine positive Festlegung in der Raumordnung zugunsten der PV getroffen werden, denn aktuell wird diese im LROP als wünschenswerte Option gar nicht erwähnt (LROP 2017).

Die regionale Raumplanung soll ermutigt werden, geeignete Flächen in hinreichendem Umfang als Vorrang- und Vorbehaltsgebiet zur Nutzung solarer Strahlungsenergie auszuweisen. Dabei können die im GIS-Modell ermittelten Flächen mit geringem RWS als mensch- und naturverträglich nutzbar

angesehen werden (vgl. Kap. 5.3). Bei der Gestaltung der konkreten PV-FFA sollten Mindeststandards für eine umweltschonende Ausgestaltung vorgeschrieben werden.

Für die PV-Nutzung werden insbesondere zusammenhängende Konversionsflächen interessant, sobald die Wirtschaftlichkeit außerhalb der Förderung des EEG gegeben ist (vgl. Longo 2020).

In grundwassereintragsgefährdeten Gebieten und solchen mit bereits bestehenden Einschränkungen für die Stickstoffdüngung sollte ebenfalls verstärkt über eine Nutzung von PV-FFA als Einkommensalternative für die Landwirtschaft oder eine Kombination von Anbaukulturen mit geringem N-Bedarf mit Solarstromerzeugung nachgedacht werden. Auch in diesem Themenbereich besteht weiterer Forschungsbedarf.

Empfehlung 3: Möglichst vollständige Erschließung alternativer Potentiale zur Freifläche, insbesondere der Dachflächen

Das Potential auf Dachflächen ist mit Abstand die größte Alternative zu PV-FFA (vgl. Kap. 6). Da in Niedersachsen aus verschiedenen Richtungen Druck auf die landwirtschaftlichen Flächen ausgeübt wird, sollten gleichzeitig in anderen Bereichen die Anstrengungen zur Erschließung von PV-Potentialen verstärkt werden, um die Bedarfe an PV-FFA auf landwirtschaftlichen Flächen nachhaltig zu senken. Dies könnte vor allem über eine weitgehend vollständige Nutzung von PV auf Dachflächen erfolgen.

Sowohl zu den Möglichkeiten, eine weitgehend vollständige Nutzung des Dachflächenpotentials zu erreichen, als auch zu den Optionen, die kleineren Alternativpotentiale (vgl. Kap. 6) sinnvoll zu erschließen, gibt es bislang wenig fundiertes Wissen. Hier besteht entsprechender Forschungsbedarf. Vier Bundesländer (Bremen, Hamburg, Berlin und Baden-Württemberg) versuchen mit ordnungsrechtlichen Vorschriften (Pflicht zur Errichtung von Solaranlagen unter bestimmten Bedingungen) die Nutzung des Dachflächenpotentials zu erhöhen. Soll sie weitgehend vollständig erfolgen, muss die Errichtung einer Solaranlage aber ähnlich selbstverständlich werden, wie ein Anschluss an das Stromnetz oder der Einbau von Fenstern.

Empfehlung 4: Schaffung von Anreizen für eine besonders effiziente Flächennutzung und besonders mensch- und naturverträgliche Gestaltung

Da die Effizienz der Flächennutzung sich erheblich auf die Flächeninanspruchnahme auswirkt, ist es wichtig, dass die neu entstehenden Anlagen optimiert werden. Entsprechende Anreize und Vorgaben sind hier sinnvoll, da eine rein wirtschaftliche Optimierung das Flächeneffizienzpotential häufig nicht voll ausschöpft. Das Land könnte entsprechende Handlungsempfehlungen an die Kommunen geben, wie diese Aspekte z. B. in die Bauleitplanung einfließen könnten.

Empfehlung 5: Empfehlung eines ökologischen Gesamtkonzepts für PV-FFA unter Berücksichtigung der Vornutzung der Flächen

Aus Sicht des Naturschutzes ist es wichtig, dass durch den Bau von PV-FFA der ökologische Wert der Fläche erhalten bzw. erhöht wird. Um das sicherzustellen, ist zunächst die Vornutzung der für PV-FFA ausgewiesenen Flächen zu berücksichtigen. Hieran angepasst kann ein ökologisches Gesamtkonzept für den Landschaftskontext erarbeitet und eine ökologische Bauleitplanung und Baubegleitung erstellt werden.

Planung und Management von Solarparks sollten immer mit Blick auf ökologische Zusatznutzen erfolgen. Die Entwicklung eines Werkzeuges mit der Darstellung verschiedener Managementmaßnahmen könnte in Niedersachsen die Kommunen bei einer verbesserten ökologischen Ausgestaltung von PV-FFA unterstützen (Randle-Boggis et al. 2020).

Empfehlung 6: Erfahrung mit APV ermöglichen, indem die Co-Nutzung von landwirtschaftlicher Fläche für die Agrar- und die Energieproduktion ausdrücklich erlaubt wird

In seiner jetzigen Form schließt das LROP die Nutzung von Solarenergie auf Flächen mit Nutzungsvorbehalt für Landwirtschaft ausdrücklich aus. Im Rahmen des 2. Beiratstreffens wurde diskutiert, dass ein rechtlicher Rahmen für Agrar-PV im LROP nicht vorhanden sein könne, da diese technologische Variante bei der Erstellung des LROP in 2012 noch nicht bekannt war. Aus diesem Grund bestünde eventuell juristischer Spielraum, APV auf diesen Flächen zu ermöglichen. Ein dafür nötiges juristisches Verfahren wäre allerdings sehr aufwändig, und es würde aufgrund des Präzedenzfallcharakters vermutlich eher vorsichtig vorgegangen werden.

Um Erfahrung mit der Agrar-PV sammeln zu können, sollte deswegen in der Raumordnung eine ausdrückliche Möglichkeit geschaffen werden, diese Anlagen auch auf Flächen mit Vorbehalt für landwirtschaftliche Nutzung unter Auflagen zu erlauben. Das kann beispielsweise für APV die Vorgabe sein, dass 90 - 95% der genutzten Fläche für die Landwirtschaft nutzbar bleiben.

Zwar lässt sich APV im bisherigen niedersächsischen Klima nicht besonders gut mit den hier üblichen Fruchtfolgen kombinieren (vgl. Kap. 3; Hübner und Hardeweg 2020), aber wenn zukünftig im Rahmen der Klimaveränderung nicht mehr Licht, sondern Wasser der begrenzende Faktor für das Pflanzenwachstum sein sollte, kann APV durch Absenken der Wasserverdunstung zu einer wertvollen Hilfe für die Landwirtschaft werden. Außerdem sollte nicht verkannt werden, dass durch die Kombination von Ackerbau mit APV ein voraussichtlich höherer Deckungsbeitrag erzielt werden kann, als mit einer einzelnen Fruchtart.

Daher ist es aus Sicht des Projektkonsortiums und des Beirats wichtig, Forschungs- und Demonstrationsanlagen einzurichten und die aus deren Betrieb resultierenden Erkenntnisse der Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Empfehlung 7: Kurzfristig Anlagenbau durch Nutzbarmachung der EEG-Kulisse initiieren

Um kurzfristig (vor 2023) einen Zubau von kleinen PV-FFA zu erreichen, muss die EEG-Flächenkulisse für die PV in Gebieten mit geringem RWS nutzbar gemacht werden. Die dabei real nutzbaren Kategorien sind die 110 m breiten Randstreifen an Verkehrswegen und die landwirtschaftlichen Flächen in benachteiligten Gebieten. Konversionsflächen sind in der Praxis nur in Ausnahmefällen nutzbar, da der rechtssichere Nachweis von > 50% ökologischer Beeinträchtigung eine zu hohe Hürde darstellt (Longo 2020).

Auf den 110 m Randstreifen werden PV-FFA aktuell im Wesentlichen durch den dort großzügig ausgewiesenen Vorbehalt Landwirtschaft (auch auf Flächen, die nicht landwirtschaftlich genutzt werden) verhindert. Hier sollte das LROP insofern geändert werden, dass PV-FFA auf diesen Flächen auch bei Vorbehalt Landwirtschaft erlaubt werden (vgl. Longo 2020).

Um Acker- und Grünland in benachteiligten Gebieten nutzbar zu machen, sollte das Land eine entsprechende Verordnung erlassen und die Regionalplanung auf das vorhandene Potential aufmerksam machen. Sie soll ermutigt werden, an geeigneten Stellen diese Flächen für PV-FFA freizugeben.

Die Erstellung eines landesweiten Flächenkatasters auf Grundlage des bestehenden GIS-Modells ermöglicht die Verschneidung der RWS-Klassen mit den räumlichen Daten zur EEG-Flächenkulisse und ist eine wichtige Informationsgrundlage für die Regionalplanung.

Empfehlung 8: Bereitstellung eines Werkzeugkastens und Schulungen durch das Land zur Umsetzung der Empfehlungen 3-5 und 7 in der Regionalplanung sowie Einrichtung eines Beratungsangebots für Konfliktfälle

Bislang existiert kaum Wissen um die Vorteile und Gestaltungsmöglichkeiten für einen substanziellen PV-Ausbau (vgl. Kap. 8). Damit dieser in hinreichendem Umfang und im Einklang mit anderen Landnutzungsarten, insbesondere der Landwirtschaft, des Naturschutzes und der Erholungsfunktion geschehen kann, ist eine fundierte Planung unerlässlich. Darauf Einfluss nehmen können die Träger der Regional- und Bauleitplanung. Das Land könnte diese durch Werkzeuge und Wissenstransfer unterstützen.

Um im Fall eines Konfliktes um ein Projekt die Chance auf eine Verständigung und damit auf Akzeptanz wie auch die Realisierung des Projektes zu erhöhen, ist es wichtig, den Beteiligten ein Angebot an kommunikativen Dienstleistungen zugänglich zu machen, was die Organisation und Moderation von Bürgerveranstaltungen, die Klärung fachlicher Streitpunkte mittels Experten, die Erstellung von Informationsmaterialien sowie Konfliktbearbeitung und Mediationsverfahren beinhaltet. Auf dieses Angebot sollen die kommunalen Entscheidungsträger aufmerksam gemacht werden.

9.2.2 Empfehlungen an die kommunalen Stakeholder

Empfehlung 1: Ausweisung geeigneter Flächen für PV-FFA unter Beteiligung der Öffentlichkeit und der Anwohnenden

Für die Akzeptanz des Projektes sind die frühe Information und die Mitgestaltungsmöglichkeiten in der Lokalisierung und Ausgestaltung von entscheidender Bedeutung. Daher ist es wichtig, die Anwohnenden bereits in der frühen Planungsphase mit einzubeziehen. In diesem Zusammenhang können Informationen vermittelt werden zu finanzieller kommunaler Teilhabe, zum Stand der Technik und zu Möglichkeiten, die Anlagen in Hinblick auf Naturschutz, Flächennutzung oder landschaftsbildliche Integration zu gestalten.

Empfehlung 2: Entwicklung eines ökologischen Gesamtkonzepts für die geplante PV-FFA inklusive ökologischer Baubegleitung

Damit die Umsetzung eines ökologischen Gesamtkonzepts unter Berücksichtigung der Vornutzung der für PV-FFA ausgewiesenen Fläche gelingt, ist es wichtig, eine ökologische Baubegleitung durch eine fachkundige Person, einem "Anwalt für die Belange der Natur", einzusetzen (UM BaWü). Idealerweise durch die Landschaftsplaner und Bauleiter, die bereits bei der Bauleitplanung (Umweltprüfung, Grünordnungsplan und Festsetzungen im Bebauungsplan) und mit der Ausführung betraut waren (UM BaWü).

Vor allem die baubedingten Auswirkungen können durch eine ökologische Baubegleitung effektiv minimiert werden (ebd.). Die Umweltfolgen des Verzichts auf diese wird in Rück et al. (2011) anschaulich erläutert. Der Bau einer ca. 20 ha großen PV-FFA in Südniedersachsen führte zu Flächenversiegelung, stellenweise extrem starken Bodenverdichtungen sowie stark verändertem Profilaufbau infolge der Nivellierung der Fläche (teils über 40 cm abgeschoben) (ebd.).

Die durch die Errichtung der PV-FFA notwendigen Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen sollten vielfältige positive Auswirkungen auf die Biodiversität haben. Hier ist festzuhalten, dass die Maßnahmen in direktem räumlichem Zusammenhang mit der PV-Anlage umgesetzt werden sollen oder mit geringer räumlicher Distanz. Ansatzmöglichkeiten auf der Betriebsfläche sind vielfältig und reichen von alternativen Begrünungsmaßnahmen und Etablierung von Hochstaudenfluren, über Heckenpflanzungen oder die Anbringung von Nisthilfen, bis hin zur Anlage von Sonderbiotopen wie

Tümpeln und Lesesteinhaufen. Die Umsetzung der Ausgleichsmaßnahmen innerhalb der Anlagen können ebenfalls zur Schonung landwirtschaftlicher Flächen beitragen (Enkhardt 2020a).

Empfehlung 3: Ermöglichung von Bürgerbeteiligung an der Solaranlage

Um bei der Planung eine echte Mitsprache zu ermöglichen, ist es wichtig, niederschwellige finanzielle Beteiligungsmöglichkeiten an dem Projekt anzubieten. Die Rechtsform einer Beteiligungsgesellschaft kann eine Haftung der Gesellschafter mit ihrem Vermögen vermeiden (z. B. GmbH, GmbH & CoKG oder Genossenschaft).

9.3 Ausblick und weiterer Forschungsbedarf

Auch wenn bezüglich der Analyse des Raumwiderstandes gegenüber den verschiedenen Typen von PV-FFA deutliche Wissenslücken über die genauen Auswirkungen auf einzelne Flächenkategorien bestehen und differenziertere regionale Daten (z. B. bezüglich des Grünlandes) bisher im GIS-Modell nicht berücksichtigt werden konnten, verdeutlichen die Projektergebnisse, dass in Niedersachsen ein großes Potential für Solarenergie existiert. Dieses Potential besser als bisher zu heben, ist elementar für den Erfolg der Energiewende. Gleichzeitig bieten sich Chancen für Wertschöpfung in Niedersachsen. Die Ergebnisse und auch die engagierten Diskussionen der Stakeholder im Beirat zeigen ebenfalls deutlich, dass die Flächen, die mensch- und naturverträglich für PV nutzbar sind, auch als Flächen für die Landwirtschaft von großer Bedeutung sind. INSIDE zeigt aber auch die große technologische Bandbreite und Anpassungsfähigkeit der PV, die viele neue Nutzungsmöglichkeiten eröffnet. Ein besonderes Augenmerk könnte daher auf der Kombination von PV-Anlagen mit z. B. Landwirtschaft, aber auch mit Natur- oder Habitatschutz liegen. Eine zentrale Forderung aus dem Beirat ist, Anlagen dieser Art in Niedersachsen im Rahmen von Forschungs- oder Demonstrationsprojekten zu erproben. Dadurch kann zum einen das nötige Wissen für die regionale Nutzung von APV generiert werden, denn Ergebnisse aus anderen Regionen sind nicht unbedingt nach Niedersachsen übertragbar. Zum anderen können gelungene Projekte dazu beitragen, die Akzeptanz für PV bei allen Stakeholdern zu erhöhen.

Zusätzlich müssen die gesetzlichen Rahmenbedingungen verbessert werden. Im LROP sind Mindestflächen für Windenergie und dezidierte Flächen für Großkraftwerke genannt. Für Wasserstoffanlagen erarbeitet das Land gerade eine Roadmap, nur für die Solarenergie gibt es bislang keine Zielwerte. Für die Freiflächenanlagen könnte dies über die Raumordnung eingeführt werden. Für die Dachflächen könnten ordnungsrechtliche Regelungen analog zu anderen Bundesländern genutzt werden. Die Ableitung von sinnvollen Zielwerten für den Solarenergieausbau könnte durch Szenarioanalysen ermittelt werden, unter Berücksichtigung der Klimaziele und den Entwicklungen und Plänen bei Wind- und Bioenergie.

10 Literaturverzeichnis

- 3N (2019): Biogas in Niedersachsen. Inventur 2018. Hg. v. 3N Kompetenzzentrum Niedersachsen Netzwerk. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML); Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie und Klimaschutz (MU). Hannover.
- Acar, Canan; Dincer, Ibrahim (2017): Environmental impact assessment of renewables and conventional fuels for different end use purposes. In: *IJGW* 13 (3/4), S. 260. DOI: 10.1504/IJGW.2017.10007766.
- Adeh, Elnaz Hassanpour; Selker, John S.; Higgins, Chad W. (2018): Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. In: *PloS one* 13 (11), e0203256. DOI: 10.1371/journal.pone.0203256.
- AdV (2015): ATKIS-Objektartenkatalog Basis-DLM Version 7.0.2. Hg. v. Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland.
- AEE (2020): Föderal Erneuerbar. Bundesländer mit neuer Energie. Hg. v. Agentur für erneuerbare Energien. Online verfügbar unter https://www.foederal-erneuerbar.de/startseite, zuletzt geprüft am 28.04.2020.
- Agora Energiewende (2019): Die Energiewende im Stromsektor: Stand der Dinge 2018. Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2019. Online verfügbar unter www.agora-energiewende.de, zuletzt geprüft am 27.04.2020.
- Airport Weeze (21.09.2016): Airport Weeze errichtete Solar-Carports Airport Weeze Flughafen. Weeze. Online verfügbar unter https://airport-weeze.com/de/airport_weeze_errichtete_solar-carports.html, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- Altmann, S. (2020): Wirtschaftlichkeit von PV-Freiflächenanlagen (Solardach Invest GmbH), 05.05.2020. mündliche Mitteilung.
- Amaducci, Stefano; Yin, Xinyou; Colauzzi, Michele (2018): Agrivoltaic systems to optimise land use for electric energy production. In: *Applied Energy* 220, S. 545–561. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.03.081.
- Archiv (2011): Weltweit erste Photovoltaik-Anlage mit Solar-Carports auf einem Parkhaus. In: *Solarserver*, 24.02.2011. Online verfügbar unter https://www.solarserver.de/2011/02/24/weltweiterste-photovoltaik-anlage-mit-solar-carports-auf-einem-parkhaus/, zuletzt geprüft am 14.05.2020.
- ARGE Monitoring PV-Anlagen (2007): Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen. Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz unf Reaktorsicherheit. Hannover.
- Armstrong, Alona; Ostle, Nicholas J.; Whitaker, Jeanette (2016): Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. In: *Environ. Res. Lett.* 11 (7), S. 74016. DOI: 10.1088/1748-9326/11/7/074016.
- B&W Energy GmbH & Co. KG (2016): 2 MWp "Solarpark de Kwekerij". Online verfügbar unter https://www.bw-energy.de/referenz/solarpark-de-kwekerij/, zuletzt geprüft am 13.08.2020.
- Barron-Gafford, Greg A.; Minor, Rebecca L.; Allen, Nathan A.; Cronin, Alex D.; Brooks, Adria E.; Pavao-Zuckerman, Mitchell A. (2016): The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. In: *Scientific reports* 6, S. 35070. DOI: 10.1038/srep35070.
- Beck, Michael (2019): AgroPV Forschungsergebnisse und Erfahrungen an der HSWT. APV-RESOLA Abschlusskonferenz. FhG-ISE. Berlin, 06.05.2019, zuletzt geprüft am 31.03.2020.
- BfN (2005): Landschaftstypen, -bewertung. Geodaten. Datenformat: Shapefile; Projektion: DHDN 3 Degree Gauss Zone 3.
- BfN (2012a): Landschaftssteckbrief Bersenbrücker Land. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Online verfügbar unter
 - https://www.bfn.de/landschaften/steckbriefe/landschaft/show/58500.html?tx_lsprofile_pi1%5Bbunde

- sland%5D=14&tx_lsprofile_pi1%5BbackPid%5D=13857&cHash=51c44e40b431c48d40148758e442 949b, zuletzt geprüft am 04.05.2020.
- BfN (2012b): Landschaftssteckbrief Innerstebergland. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Online verfügbar unter
 - https://www.bfn.de/landschaften/steckbriefe/landschaft/show/37900.html?tx_lsprofile_pi1%5Bbunde sland%5D=14&tx_lsprofile_pi1%5BbackPid%5D=13857&cHash=07891b034c16acadf18aa90794be 8d56, zuletzt geprüft am 04.05.2020.
- BfN (2012c): Landschaftssteckbrief Ostfriesische Seemarschen. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Online verfügbar unter
 - https://www.bfn.de/landschaften/steckbriefe/landschaft/show/61100.html?tx_lsprofile_pi1%5Bbunde sland%5D=14&tx_lsprofile_pi1%5BbackPid%5D=13857&cHash=15f425f26e976efaeedcf7e7a0f4b5 c9, zuletzt geprüft am 04.05.2020.
- BfN (2012d): Landschaftssteckbrief Zevener Geest. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Online verfügbar unter
 - https://www.bfn.de/landschaften/steckbriefe/landschaft/show/63401.html?tx_lsprofile_pi1%5Bbunde sland%5D=14&tx_lsprofile_pi1%5BbackPid%5D=13857&cHash=6af9be1d0212a4f082dc85bf1e3b6 99c, zuletzt geprüft am 04.05.2020.
- BfN (2014a): Grünland-Report: Alles im Grünen Bereich? Bonn, Bad Godesberg, 2014.
- BfN (2014b): Landschaftssteckbriefe Niedersachsen. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Online verfügbar unter
 - https://www.bfn.de/landschaften/steckbriefe/landschaft/list.html?tx_lsprofile_pi1%5BbackPid%5D=1 3857&tx_lsprofile_pi1%5Bbundesland%5D=14&cHash=4cfbfa08c4edc6113ae6479d268a5843, zuletzt geprüft am 04.05.2020.
- BfN (2019): FFH-VP-Info: Fachinformationssystem zur FFH-Verträglichkeitsprüfung. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Online verfügbar unter https://ffh-vp-info.de/FFHVP/Page.jsp, zuletzt geprüft am 07.05.2020.
- BMUB (2015): Indikatorenbericht 2014 zur Nationalen Strategie zur biologischen Vielfalt. 1. Aufl. Online verfügbar unter https://www.bfn.de/themen/monitoring/indikatoren/indikator-artenvielfalt-und-landschaftsqualitaet.html.
- BMVI (2015): Räumlich differenzierte Flächenpotentiale für erneuerbare Energien in Deutschland. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin (BMVI-Online-Publikation, 08/2015).
- BMVI (2016): Statistik des Lärmschutzes an Bundesfernstraßen 2016. Hg. v. Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI). Berlin, zuletzt geprüft am 13.08.2020.
- BMWi (2019): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2018. Hg. v. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/Berichte/erneuerbare-energien-in-zahlen-2018.pdf? blob=publicationFile&v=6, zuletzt geprüft am 28.04.2020.
- Boll, Thiemen (2016): Auswirkungen des Dendromasseanbaus in Kurzumtriebsplantagen auf die ästhetische Qualität und die Erholungseignung der Landschaft. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Hannover. Fakultät für Architektur und Landschaft.
- Bug, J.; Engel, N.; Gehrt, E.; Krüger, K. (2019): Schutzwürdige Böden in Niedersachsen. Hg. v. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie (LBEG). Hannover (GeoBerichte, 8).
- BUND (2011): Position: Photovoltaik-Freianlagen: Optimierungsmöglichkeiten aus Sicht des Naturschutzes. Schwerin. Müller, A., Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland (BUND), Landesverband Mecklenburg-Vorpommern.
- Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (2019): Baumobstanbau in Deutschland 2005 bis 2018. Online verfügbar unter https://www.bmel
 - statistik.de/landwirtschaft/gartenbau/produktionsgartenbau/, zuletzt geprüft am 06.05.2020.

- Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Stadtentwicklung (BMVBS) (03.08.2012): Gemeinsame Grundsätze des Bundes und der Länder für die Anlage und den Betrieb von Flugplätzen für Flugzeuge im Sichtflugbetrieb. BAnz AT 24.08.2012 B3. Online verfügbar unter https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Unternehmen/Richtlinien/GG_Sichtflugbetrieb%20NfL%20I%2 092-13.pdf, zuletzt geprüft am 31.03.2020.
- Bundesnetzagentur (2020): Herzlich willkommen im Marktstammdatenregister! Hg. v. Bundesnetzagentur. Online verfügbar unter https://www.marktstammdatenregister.de/MaStR, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- Busch, M.; Trautmann, S.; Gerlach, B. (2017): Overlap between breeding season distribution and wind farm risks: a spatial approach. In: *Vogelwelt* (137), S. 169–180.
- Demuth, Bernd (2000): Das Schutzgut Landschaftsbild in der Landschaftsplanung.

 Methodenüberprüfung anhand ausgewählter Beispiele der Landschaftsrahmenplanung. 1. Aufl.:

 Mensch und Buch. Online verfügbar unter

 http://landschaftsbild.info/pdf/Schutzgut_Landschaftsbild.pdf, zuletzt geprüft am 23.04.2020.
- Demuth, Bernd; Maack, Alexander; Schuhmacher, Jochen (2019): Klima- und Naturschutz: Hand in Hand. Ein Handbuch für Kommunen, Regionen, Klimaschutzbeauftragte, Energie-, Stadt- und Landschaftsplanungsbüros. Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Planung und Installation mit Mehrwert für den Naturschutz. Hg. v. Stefan Heiland. Berlin (6).
- Deutsche UNESCO-Kommission (Hg.) (2017): Erneuerbare Energien sind unerlässlich für Biosphärenreservate. Interview mit Peter Dogsé auf dem internationalen Workshop "Erneuerbare Energien und Biosphärenreservate" vom 11. bis 13. September im Biosphärenreservat Bliesgau, Saarland (Auf ein Wort, September 2017).
- DeVault, Travis L.; Seamans, Thomas W.; Schmidt, Jason A.; Belant, Jerrold L.; Blackwell, Bradley F.; Mooers, Nicole et al. (2014): Bird use of solar photovoltaic installations at US airports. Implications for aviation safety. In: *Landsc Urban Plan* 122, S. 122–128. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2013.11.017.
- Diller, C. (2018): Instrumente der Raumplanung. In: ARL Akademie für Raumforschung und Landesplanung (Hg.): Handwörterbuch der Stadt- und Raumentwicklung. Hannover.
- DLR; IWES; IFNE (2012): Langfristszenarien und Strategien für den Ausbau der erneuerbaren Energien in Deutschland bei Berücksichtigung der Entwicklung in Europa und global. Schlussbericht. Hg. v. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Fraunhofer Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik (IWES) und Ingenieurbüro für neue Energien (IFNE). Online verfügbar unter
 - https://www.fvee.de/publikationen/publikation/?sb_damorder%5Buid%5D=4636&cHash=06b2c3f1ab6b2757a44b77db72802b87, zuletzt geprüft am 27.04.2020.
- Dressel, Norbert (Wuppertal). 28.03.2019, Wuppertal. Mündliche Mitteilung an ISFH.
- Dullweber, Thorsten; Kranz, Christopher; Peibst, Robby; Baumann, Ulrike; Hannebauer, Helge; Fülle, Alexander et al. (2016): PERC+: industrial PERC solar cells with rear Al grid enabling bifaciality and reduced Al paste consumption. In: *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 24 (12), S. 1487–1498. DOI: 10.1002/pip.2712.
- Dullweber, Thorsten; Schulte-Huxel, Henning; Blankemeyer, Susanne; Hannebauer, Helge; Schimanke, Sabrina; Baumann, Ulrike et al. (2018): Present status and future perspectives of bifacial PERC+ solar cells and modules. In: *Jpn. J. Appl. Phys.* 57 (8S3), 08RA01. DOI: 10.7567/JJAP.57.08RA01.
- EEX (2020): Futures. EEX German Power Future. Online verfügbar unter https://www.eex.com/en/market-data/power/futures#%7B%22snippetpicker%22%3A%22EEX%20German%20Power%20Future%22%3D, zuletzt aktualisiert am 12.08.2020, zuletzt geprüft am 12.08.2020.

- Elamri, Y.; Cheviron, B.; Lopez, J.-M.; Dejean, C.; Belaud, G. (2018a): Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. In: *Agricultural Water Management* 208, S. 440–453. DOI: 10.1016/j.agwat.2018.07.001.
- Elamri, Yassin; Cheviron, Bruno; Mange, Annabelle; Dejean, Cyril; Liron, François; Belaud, Gilles (2018b): Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. In: *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 22 (2), S. 1285–1298. DOI: 10.5194/hess-22-1285-2018.
- Elsner, Peter; Fischedick, Manfred; Sauer, Dirk Uwe (Hg.) (2015): Flexibilitätskonzepte für die Stromversorgung 2050. Technologien Szenarien Systemzusammenhänge. München: acatech Deutsche Akademie der Technikwissenschaften e.V (Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft). Online verfügbar unter
 - http://www.acatech.de/de/publikationen/stellungnahmen/kooperationen/detail/artikel/flexibilitaetskon zepte-fuer-die-stromversorgung-2050-technologien-szenarien-systemzusammenh.html.
- Enkhardt, S. (2019): EnBW macht Weg frei für Baustart des 175 Megawatt Solarparks ohne EEG-Förderung. In: *pv magazine*, 16.10.2019. Online verfügbar unter https://www.pv-magazine.de/2019/10/16/enbw-macht-weg-frei-fuer-baustart-des-175-megawatt-solarparks-ohne-eeg-foerderung/, zuletzt geprüft am 13.05.2020.
- Enkhardt, S. (2020a): Bayern will ökologische Ausgleichsmaßnahmen künftig innerhalb der Photovoltaik-Freiflächenanlagen ermöglichen. In: *pv magazine*, 2020. Online verfügbar unter https://www.pv-magazine.de/2020/07/02/bayern-will-oekologische-ausgleichsmassnahmen-kuenftig-innerhalb-der-photovoltaik-freiflaechenanlagen-ermoeglichen/, zuletzt geprüft am 13.08.2020.
- Enkhardt, S. (2020b): Photovoltaik-Zubau in Deutschland schrammt 2019 knapp an Vier-Gigawatt-Marke vorbei. In: *pv magazine*, 31.01.2020. Online verfügbar unter https://www.pv-magazine.de/2020/01/31/photovoltaik-zubau-in-deutschland-schrammt-2019-knapp-an-vier-gigawatt-marke-vorbei/, zuletzt geprüft am 13.05.2020.
- Enkhardt, S. (2020c): Deutsche Braunkohle-Tagebauseen bieten wirtschaftliches Potenzial für knapp 3 Gigawatt schwimmende Photovoltaik-Anlagen. In: *pv magazine*, 03.02.2020. Online verfügbar unter https://www.pv-magazine.de/2020/02/03/deutsche-braunkohle-tagebauseen-bieten-wirtschaftliches-potenzial-fuer-knapp-3-gigawatt-schwimmende-photovoltaik-anlagen/.
- European Commission Agriculture and Rural Development (2020): Apple Dashboard. Online verfügbar unter https://ec.europa.eu/info/food-farming-fisheries/farming/facts-and-figures/markets/overviews/market-overview-sector en, zuletzt geprüft am 06.05.2020.
- F. Holmgren, William; W. Hansen, Clifford; A. Mikofski, Mark (2018): pvlib python: a python package for modeling solar energy systems. In: *JOSS* 3 (29), S. 884. DOI: 10.21105/joss.00884.
- Faulstich, Martin; Beck, Hans-Peter; Haaren, Christina von; Kuck, Jürgen; Rode, Michael; Ahmels, Jan et al. (2016): Szenarien zur Energieversorgung in Niedersachsen im Jahr 2050. Gutachten. Hg. v. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU). Hannover.
- Feltwell, John (2013): Are photovoltaic solar arrays an influencing factor in avian mortality? In: *The Newsletter of the Kent Field Club* (77).
- Fraunhofer ISE (03.02.2020): Fraunhofer ISE analysiert Potenzial für Solarkraftwerke auf Braunkohle-Tagebauseen. Schneider, Karin, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- Fürst, D. (2003): Zwischen staatlicher Steuerung und Selbstregulierung Raumordnung und Landesentwicklung mit neuem Anspruch. In: F. E. Anhelm und P.-J. Schneider (Hg.): Zukunftsfähiges Niedersachsen. Landesentwicklung und Raumordnung: Gleichwertigkeit der Lebensbedingungen in Stadt und Land. Loccumer Protokolle. 2., überarb. Aufl. Rehburg-Loccum: Ev. Akad (Loccumer Protokolle, 2002,40).
- Gehrlein, Ulrich; Mengel, Andreas; Milz, Eva (2017): Nationale Naturlandschaften (NNL) und erneuerbare Energie. Ein Handlungsleitfaden. Bonn-Bad Godesberg: Bundesamt für Naturschutz (BfN-Skripten, 467). Online verfügbar unter http://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript467.pdf.

- Gewohn, T.; Blankemeyer, S.; Vogt, M. R.; Schulte-Huxel, H.; Köntges, M.; Lim, B. et al. (2018): Laminated Textiles Enabling Custom Appearance of Building Integrated Photovoltaic Modules. 3 pages / 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1842-1844 / 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1842-1844. DOI: 10.4229/35THEUPVSEC20182018-6BV.1.58.
- Gharadjedaghi, B.; Heimann, R.; Lenz, K.; Martin, C.; Pieper V.; Schulz, A. et al. (2004): Verbreitung und Gefährdung schutzwürdiger Landschaften in Deutschland. In: *Natur und Landschaft* 79 (2).
- Graser-Kühnle, S. (2017): Solarpark Berghülen offiziell eröffnet. Gegen die Berghüler Anlage gab es heftigen Widerstand. Bei der Einweihung wurde sie in den höchsten Tönen als umweltfreundlich und beispielhaft gelobt. In: Südwest Presse Online, 2017. Online verfügbar unter https://www.swp.de/suedwesten/landkreise/alb-donau/solarpark-23550537.html, zuletzt geprüft am 13.08.2020.
- Guerin, Turlough (2017): A case study identifying and mitigating the environmental and community impacts from construction of a utility-scale solar photovoltaic power plant in eastern Australia. In: *Solar Energy* 146, S. 94–104. DOI: 10.1016/j.solener.2017.02.020.
- Guiller, Clémence; Affre, Laurence; Deschamps-Cottin, Magali; Geslin, Benoît; Kaldonski, Nicolas; Tatoni, Thierry (2017): Impacts of solar energy on butterfly communities in mediterranean agroecosystems. In: *Environ. Prog. Sustainable Energy* 36 (6), S. 1817–1823. DOI: 10.1002/ep.12626.
- Gunzelmann, T.; Viebrock, J. (2001): Denkmalpflege und historische Kulturlandschaft. 16. Aufl. Hg. v. Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland (Arbeitsblatt).
- Hartmann, S. (2010): Die richtige Ansaatmischung abhängig von Standort und Beweidungssystem. In: Tagungsunterlagen Dienstleistung Schafbeweidung Perspektiven für die Zukunft? Würzburg, 2010. AELF.
- Herden, Christoph; Martin, C. (2005): Konfliktanalyse für Photovoltaikanlagen im Amtsbereich Wiedingharde. Teilfortschreibung des Landschaftsplanes Amt Wiedingharde.
- Herden, Christoph; Rassmus, Jörg; Gharadjedaghi, Bahram (2009): Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen. In: *BfN-Skripten* (247).
- Hering, S. (2019): Fläche aufgewertet: Naturschutzpreis geht an Cottbuser Firma. In: *Lausitzer Rundschau*, 2019. Online verfügbar unter https://www.lr-online.de/lausitz/forst/flaeche-aufgewertet-naturschutzpreis-geht-an-cottbuser-firma-40420495.html.
- Hermes, Johannes; Albert, Christian; Haaren, Christina von (2018): Assessing the aesthetic quality of landscapes in Germany. In: *Ecosystem Services* 31, S. 296–307. DOI: 10.1016/j.ecoser.2018.02.015.
- Hernandez, R. R.; Easter, S. B.; Murphy-Mariscal, M. L.; Maestre, F. T.; Tavassoli, M.; Allen, E. B. et al. (2014): Environmental impacts of utility-scale solar energy. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29, S. 766–779. DOI: 10.1016/j.rser.2013.08.041.
- Hildebrandt, H.; Zwosta, N. (2019): Innovative PV-Projekte. Next2Sun-Produktbroschüre. Hg. v. Next2Sun GmbH. Merzig. Online verfügbar unter www.next2sun.de, zuletzt geprüft am 31.03.2020.
- Holst, H.; Winter, M.; Vogt, M.-R.; Bothe, K.; Köntges, M.; Brendel, R.; Altermatt, P.-R. (2013): Application of a new ray tracing framework to the analysis of extended regions in Si solar cell modules. In: *Energy Procedia* (38), S. 86–93.
- Horváth, Gábor; Blahó, Miklós; Egri, Adám; Kriska, György; Seres, István; Robertson, Bruce (2010): Reducing the maladaptive attractiveness of solar panels to polarotactic insects. In: *Conserv Biol* 24 (6), S. 1644–1653. DOI: 10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x.
- HTW Dresden (2018): Einfluss von Solaranlagen auf den Bodenwasserhaushalt und Agro-Photovoltaik (MatEnUm-2). Unter Mitarbeit von Ulrike Feistel und Knut Schmidtke. Online verfügbar unter https://apps.htw-dresden.de/app
 - fis/frontend/ausgabe/forschungsarbeiten/?tx_ezqueries_ezqueriesplugin%5Bfilters%5D%5Bm_forschungseintrag_id%5D=215732&tx_ezqueries_ezqueriesplugin%5Bfilters%5D%5Bfilters%5D%5BfilterType%5D=strict, zuletzt geprüft am 26.04.2020.

- Hübner, G.; Völkl, W.; Romstöck-Völkl, M. (2014): Monitoring von Zielarten zur Wirkungskontrolle von Ausgleichs- und Minimierungsmaßnahmen im Solarpark Grafenwöhr-Hütten. Unveröff. Bericht.
- Hübner, Gundula; Pohl, Johannes; Warode, Jan; Gotchev, Boris; Nanz, Patrizia; Ohlhorst, Dörte et al. (2019): Naturverträgliche Energiewende. Akzeptanz und Erfahrungen vor Ort. Online verfügbar unter https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/biologischevielfalt/Bilder/PdM/2019_12/BfN-Broschuere_Akzeptanz_bf.pdf.
- Hübner, S.; Hardeweg, B. (2020): Gutachten im Auftrag des ISFH und des Instituts für Umweltplanung, Leibniz Universität Hannover. Hannover.
- Hunziker, Marcel; Michel, Annina; Buchecker, Matthias (2014): Landschaftsveränderungen durch erneuerbare Energien aus Sicht der Bevölkerung. In: Landschaft und Energiewende : der Einfluss erneuerbarer Energien auf die Landschaft, Seite 43-49.
- ISFH (2020): Eigene Berechnungen ISFH.
- Jager-Waldau, Arnulf; Huld, Thomas; Bodis, Katalin; Szabo, Sandor (2018): Photovoltaics in Europe after the Paris Agreement. In: 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC). (a joint conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC): 10-15 June 2018. 2018 IEEE 7th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC) (A Joint Conference of 45th IEEE PVSC, 28th PVSEC & 34th EU PVSEC). Waikoloa Village, HI, 10.06.2018 15.06.2018. World Conference on Photovoltaic Energy Conversion; Institute of Electrical and Electronics Engineers; IEEE World Conference on Photovoltaic Energy Conversion; WCPEC; IEEE PVSC; IEEE Photovoltaic Specialists Conference; PVSEC; Photovoltaic Science and Engineering Conference; EU PVSEC; European Photovoltaic Solar Energy Conference. Piscataway, NJ: IEEE, S. 3835–3837, zuletzt geprüft am 09.09.2019.
- Jahanfar, Ali; Drake, Jennifer; Sleep, Brent; Margolis, Liat (2019): Evaluating the shading effect of photovoltaic panels on green roof discharge reduction and plant growth. In: *Journal of Hydrology* 568, S. 919–928. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2018.11.019.
- Kagan, R. A.; Viner, T. C.; Trail, P. W.; Espinoza, E. O. (2014): Avian Mortality at Solar Energy Facilities in Southern California: A Preliminary Analysis. Ashland: National Fish and Wildlife Forensics Laboratory.
- Kavlak, Goksin; McNerney, James; Trancik, Jessika E. (2018): Evaluating the causes of cost reduction in photovoltaic modules. In: *Energy Policy* 123, S. 700–710. DOI: 10.1016/j.enpol.2018.08.015.
- Keienburg, T.; Most, A.; Prüter, J. (Hg.) (2006): Entwicklung und Erprobung von Methoden für die ergebnisorientierte Honorierung ökologischer Leistungen im Grünland Nordwestdeutschlands. Schneverdingen (NNA-Berichte Jg. 19, 1).
- Kelm, Tobias; Metzger, Jochen; Jachmann, Henning; Günnewig, Dieter; Püschel, Michael; Schicketanz, Sven et al. (2018): Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Hg. v. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg. Stuttgart. Online verfügbar unter https://www.erneuerbare-energien.de/EE/Redaktion/DE/Downloads/bmwi_de/bericht-eeg-4-solar.pdf?__blob=publicationFile&v=4, zuletzt geprüft am 24.04.2019.
- Knipfer, G.; Raab, Bernd (2013): Naturschutzfachliche Untersuchungen von Freilandphotovoltaikanlagen in der Oberpfalz (Lkr. Neumarkt i. d. Opf. und Regensburg). Unveröff. Gutachten i. A. Landesbund für Vogelschutz e.V. Hilpoltstein.
- Knoll, T. (2011): PHOTOVOLTAIK IN DER LANDSCHAFT. Steuerungsstrategie für Photovoltaik-Freiflächenanlagen aus der Sicht des Naturschutzes und der Raumordnung. Online verfügbar unter https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=2ahUKEwj0wJavosXgAhXC1qQKHVIWBxAQFjAAegQIChAC&url=http%3A%2F%2Fwww.wua-wien.at%2Fimages%2Fstories%2Fpublikationen%2Fstudie-photovoltaik-landschaft.pdf&usg=AOvVaw3DSWoghQqCp6OfSvTFwk6j.

- Kost, C.; Shammugam, S.; Jülch, V.; Nguyen, H.-T.; Schlegl, T. (2018): Stromgestehungskosten erneuerbare Energien. 2. Aufl. Freiburg. Online verfügbar unter https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/DE2018_ISE_Studie Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien.pdf, zuletzt geprüft am 13.05.2020.
- Krüger, Thorsten; Ludwig, Jürgen; Pfützke, Stefan; Zang, Herwig (2014): Atlas der Brutvögel in Niedersachsen und Bremen 2005-2008. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Hannover (Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen, Heft 48).
- Krüger, Thorsten; Nipkow, Markus (2015): Rote Liste der in Niedersachsen und Bremen gefährdeten Brutvögel. 8. Fassung, Stand 2015. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN) (Informationsdienst Naturschutz Niedersachsen, Heft 4/15).
- Kruse, Jürgen; Hennes, Oliver; Wildgrube, Theresa; Lencz, Dominic; Hintermayer, Martin; Gierkink, Max et al. (2018): dena-Leitstudie Integrierte Energiewende. Impulse für die Gestaltung des Energiesystems bis 2050. Hg. v. dena. ewi Energy Research & Scenarios gGmbH. Berlin. Online verfügbar unter https://www.dena.de/fileadmin/dena/Dokumente/Pdf/9261_dena-Leitstudie_Integrierte_Energiewende_lang.pdf, zuletzt geprüft am 18.07.2019.
- 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. 5 pages / 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1488-1492 / 35th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition; 1488-1492. DOI: 10.4229/35THEUPVSEC20182018-6AO.8.6.
- Landeck, Ingmar; Hildmann, Christian; Kempe, Karin; Gharadjedaghi, Bahram; Martin, Christof (2014): Langzeitwirkung von Photovoltaik-Freiflächenanlagen auf Natur und Landschaft.
- Leitner, H. (2020): Aufständerungssysteme APV. Leitner Energy GmbH, 28.02.2020. mündliche Mitteilung.
- LfU, Ref. 93 (2013): Planung und Errichtung von Freiflächen-Photovoltaikanlagen in Trinkwasserschutzgebieten. Hg. v. Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU) (Sammlung von Schriftstücken (Merkblätter, Schreiben, Hinweise) der Bayerischen Wasserwirtschaft (Slg Wasser), Nr. 1.2/9).
- Lieder, Klaus; Lumpe, Josef (2012): Vögel im Solarpark eine Chance für den Artenschutz?: Auswertung einer Untersuchung im Solarpark Ronneburg "Süd I". In: *Thüringer ornithologische Mitteilungen* 56, S. 13-25.
- Longo, Fabio (2020): Bedingungen für Freiflächen-Photovoltaik in Niedersachsen nach Erneuerbare-Energien- und Raumordnungsrecht. Juristisches Kurzgutachten im Rahmen des Forschungsprojekts INSIDE. Anhang zum Forschungsbericht.
- Lovett, Andrew; Appleton, Katy; Warren-Kretzschmar, Barty; Haaren, Christina von (2015): Using 3D visualization methods in landscape planning: An evaluation of options and practical issues. In: *Landscape and Urban Planning* 142, S. 85–94. DOI: 10.1016/j.landurbplan.2015.02.021.
- LROP (2017): Verordnung über das Landes-Raumordnungsprogramm Niedersachsen. LROP-VO, vom 26.09.2017. Fundstelle: Nds. GVBI. 2017, 378.
- LSN (2019): Niedersächsische Energie- und CO2-Bilanzen 2017. Hg. v. Landesamt für Statistik Niedersachsen (LSN). Online verfügbar unter https://www.statistik.niedersachsen.de/startseite/themen/umwelt_und_energie/themenbereich-umwelt-und-energie-service-87639.html, zuletzt geprüft am 26.04.2020.
- M. Probst; B. Volz (2020): Besonderheiten und Betrieb der Next2Sun-PV-Anlage. NEXT2SUN.webinar2020. online, 29.05.2020. Online verfügbar unter https://vimeo.com/424020588.
- M. Schachinger (2020): Marktanalyse Juli 2020 Kampf der Giganten reloaded. pvXchange. Online verfügbar unter https://www.pvxchange.com/de/marktanalyse-juli-2020-kampf-der-giganten-reloaded, zuletzt aktualisiert am 11.08.2020, zuletzt geprüft am 11.08.2020.

- Macknick, Jordan; Beatty, Brenda; Hill, Graham (2013): Overview of Opportunities for Co-Location of Solar Energy Technologies and Vegetation.
- Marrou, H.; Dufour, L.; Wery, J. (2013a): How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system? In: *European Journal of Agronomy* 50, S. 38–51. DOI: 10.1016/j.eja.2013.05.004.
- Marrou, H.; Guilioni, L.; Dufour, L.; Dupraz, C.; Wery, J. (2013b): Microclimate under agrivoltaic systems. Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? In: *Agricultural and Forest Meteorology* 177, S. 117–132. DOI: 10.1016/j.agrformet.2013.04.012.
- Mertens, Konrad (2013): Photovoltaik. Lehrbuch zu Grundlagen, Technologie und Praxis; mit 31 Tabellen. 2., neu bearb. Aufl. München: Fachbuchverlag Leipzig. Online verfügbar unter http://www.hanser-elibrary.com/action/showBook?doi=10.3139/9783446434110.
- ML (2012): Begründung zu der Verordnung zur Änderung der Verordnung über das Landes-Raumordnungsprogramm Niedersachsen. Hg. v. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML). Online verfügbar unter https://ml.niedersachsen.de/download/71904/Begruendung_und_Umweltbericht_fuer_doppelseitige n Druck .pdf.
- ML (2015): AUM Details zu den Maßnahmen. Hg. v. Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (ML). Online verfügbar unter https://www.ml.niedersachsen.de/startseite/themen/landwirtschaft/agrarforderung/agrarumweltmass nahmen_aum/aum_details_zu_den_massnahmen/wichtige-hinweise-zum-antragsverfahren-145542.html, zuletzt geprüft am 24.03.2020.
- Montag; H.; Parker, D.; Clarkson, T. (2016): The Effects of Solar Farms on Local Biodiversity. A Comparative Study.
- MU Nds. (2017): Niedersächsische Naturschutzstrategie. Ziele, Strategien und prioritäre Aufgaben des Landes Niedersachsen im Naturschutz. Hg. v. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU). Hannover.
- MU Nds. (2018): Energiewendebericht 2018. Hg. v. Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU). Online verfügbar unter https://www.umwelt.niedersachsen.de/themen/energie/energiewende/energiewendebericht-2018-119325.html, zuletzt geprüft am 28.04.2020.
- Müller, A.; Feller, C. (2018): Nachbau bedingte Wachstumsreduktion und Identifikation verschiedener Pathogene in den Böden dreier Brandenburger Apfelanlagen. Project: NewSoil21: Mitigation strategies for apple and asparagus replant disease specifically under growth conditions in the Brandenburg Area. DGG and BHGL Annual Conference 2018, 2018.
- NABU (2005): Kriterien für naturverträgliche Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Basierend auf einer Vereinbarung zwischen der Unternehmensvereinigung Solarwirtschaft e.V. (heute: BSW-Solar) und Naturschutzbund Deutschland NABU. Aktualisiert im Jahr 2010. Bonn/ Berlin.
- Naspetti, S.; Mandolesi, S.; Zanoli, R. (2016): Using visual Q sorting to determine the impact of photovoltaic applications on the landscape. In: *Land Use Policy* 57, S. 564–573. DOI: 10.1016/j.landusepol.2016.06.021.
- Neuling, Eric (2009): Auswirkungen des Solarparks "Turnow-Preilack" auf die Avizönose des Planungsraums im SPA "Spreewald und Lieberoser Endmoräne". Eberswalde.
- Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU): Richtlinie über die Gewährung von Billigkeitsleistungen zur Minderung von durch Rastspitzen nordischer Gastvögel verursachten Ertragseinbußen auf landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen. RdErl. d. MU v. 9.1.2019 26-04011/03/010. Billigkeitsrichtlinie noGa-Acker, vom 09.01.2019.
- Niemann, K.; Rüter, S.; Wix, N.; Bredemeier, B.; Diekmann, L.; Reich, M.; Böttcher, M. (2019): Photovoltaik-Freiflächenanlagen und die Vernetzung von Lebensräumen an überörtlichen Verkehrswegen. In: *Naturschutz und Biologische Vielfalt* (unveröffentlicht).
- Niemann, Katharina; Rüter, Stefan; Bredemeier, Birte; Diekmann, Lara; Reich, Michael; Böttcher, Marita (2017): Photovoltaik-Freiflächenanlagen an Verkehrswegen in Deutschland. Ausbauzustand

- und mögliche Folgen für den Biotopverbund. In: *Natur und Landschaft* 92 (3), S. 119–128. DOI: 10.17433/3.2017.50153449.119-128.
- NLWKN (2013): Praxisempfehlung für niedersächsische Wasserversorgungsunternehmen und Wasserbehörden. Erstellung und Vollzug von Wasserschutzgebietsverordnungen für Grundwasserentnahmen. Handlungshilfe (Teil II). 1. Auflage. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (MU). Hannover (Grundwasser, 17). Online verfügbar unter https://www.nlwkn.niedersachsen.de/download/79999.
- NLWKN (Hg.) (2014): Hochwassergefahrenkarten/ Hochwasserrisikokarten. Erläuterungen und Lesehilfe. Norden. Online verfügbar unter https://www.nlwkn.niedersachsen.de/wasserwirtschaft/eghochwasserrisikomanagementrichtlinie/gef ahren und risikokarten/gefahren--und-risikokarten-116763.html, zuletzt geprüft am 24.03.2020.
- NLWKN (2018): Niedersächsisches Landschaftsprogramm. Kapitel 4.3 Landesweiter Biotopverbund. unveröffentlicht. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz.
- Onitsuka, Kenichiro; Ninomiya, Kento; Hoshino, Satoshi (2018): Potential of 3D Visualization for Collaborative Rural Landscape Planning with Remote Participants. In: *Sustainability* 10 (9), S. 3059. DOI: 10.3390/su10093059.
- Parker, C.; McQueen, C. (2013): Can Solar Farms Deliver Significant Benefits for Biodiversity? Online verfügbar unter http://www.wychwoodbiodiversity.co.uk/assets/solar_and_biodiversity_report_parker_mcqueen_201 3d.pdf.
- Peschel, R.; Peschel, T.; Marchand, M.; Hauke, J. (2019): Solarparks Gewinne für die Biodiversität. Hg. v. Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V. (bne). Berlin.
- Peters, Jürgen; Torkler, Frank; Hempp, Susanne; Hauswirth, Mirko (2009): Ist das Landschaftsbild berechenbar? Entwicklung einer GIS-gestützten Landschaftsbildanalyse für die Region Uckermark-Barnim als Grundlage für die Ausweisung von Windeignungsgebieten. In: *Naturschutz und Landschaftsplanung* 41 (1), S. 15–20.
- Pimentel Da Silva, Gardenio Diogo; Branco, David Alves Castelo (2018): Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts. In: *Impact Assessment and Project Appraisal* 36 (5), S. 390–400. DOI: 10.1080/14615517.2018.1477498.
- Pisinaras, Vassilios; Wei, Yang; Bärring, Lars; Gemitzi, Alexandra (2014): Conceptualizing and assessing the effects of installation and operation of photovoltaic power plants on major hydrologic budget constituents. In: *The Science of the total environment* 493, S. 239–250. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.05.132.
- Procon Solar GmbH (2020): Solarpark Frauendorf. Online verfügbar unter https://www.proconsolar.de/projektuebersicht/solarpark-frauendorf.html, zuletzt geprüft am 13.08.2020.
- Raab, Bernd (2015): Erneuerbare Energien und Naturschutz Solarparks können einen Beitrag zur Stabilisierung der biologischen Vielfalt leisten. In: *ANLiegen Natur* 37 (1), S. 67–76. Online verfügbar unter www.anl-bayern.de.
- Randle-Boggis, R. J.; White, P.C.L.; Cruz, J.; Parker, G.; Montag, H.; Scurlock, J.M.O.; Armstrong, A. (2020): Realising co-benefits for natural capital and ecosystem services from solar parks: A co-developed, evidence-based approach. In: *Renew Sust Energ Rev* (125). DOI: 10.1016/j.rser.2020.109775.
- Reeh, Martin (2010): Ein ganz besonderer Parkplatz. In: *pv magazine*, 03.06.2010. Online verfügbar unter https://www.pv-magazine.de/archiv/ein-ganz-besonderer-parkplatz/, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- Rück, Friedrich; Reichel, Andreas; Schneider, Oliver (2011): Bodenzustand nach Erstellung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage in Südniedersachsen. Tagungsbeitrag.

- Sánchez-Pantoja, Núria; Vidal, Rosario; Pastor, M. Carmen (2018): Aesthetic perception of photovoltaic integration within new proposals for ecological architecture. In: *Sustainable Cities and Society* (39), S. 203–214.
- Schaper, C. (2020): Ernteerträge konventioneller Landwirtschaft in Niedersachsen. Georg-August-Universität Göttingen, 2020. mündliche Mitteilung.
- Schindele, Stephan; Trommsdorff, Maximilian; Schlaak, Albert; Obergfell, Tabea; Bopp, Georg; Reise, Christian et al. (2020): Implementation of agrophotovoltaics: Techno-economic analysis of the price-performance ratio and its policy implications. In: *Applied Energy* 265, S. 114737. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.114737.
- Schindler, Bracha Y.; Blaustein, Leon; Lotan, Ran; Shalom, Hadar; Kadas, Gyongyver J.; Seifan, Merav (2018): Green roof and photovoltaic panel integration: Effects on plant and arthropod diversity and electricity production. In: *Journal of environmental management* 225, S. 288–299. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.08.017.
- Schinke, C.; Vogt, M. R.; Bothe, K. (2018): Optical Modeling of Photovoltaic Modules with Ray Tracing Simulations. In: M. Freunek Müller (Hg.): Photovoltaic Modeling Handbook: Wiley & Sons Ltd, S. 27–92.
- Schmidt, C.; Gagern, M. von; Lachor, M.; Hage, G.; Schuster, L.; Hoppenstedt, A. et al. (2018a): Landschaftsbild & Energiewende. Band 1: Grundlagen. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Bonn.
- Schmidt, C.; Gagern, M. von; Lachor, M.; Hage, G.; Schuster, L.; Hoppenstedt, A. et al. (2018b): Landschaftsbild & Energiewende. Band 2: Handlungsempfehlungen. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Bonn.
- Scholles, F. (1997): Abschätzen, Einschätzen und Bewerten in der UVP. Weiterentwicklung der Umweltverträglichkeitsprüfung vor dem Hintergrund der neueren Rechtslage sowie des Einsatzes rechnergestützter Werkzeuge. In: *UVP-Spezial*, S. 273.
- Scholles, F. (2008): Die Ökologische Risikoanalyse und ihre Weiterentwicklung. In: D. Fürst und F. Scholles (Hg.): Handbuch Theorien und Methoden der Raum- und Umweltplanung. 3. Aufl. Dortmund: Rohn-Verlag.
- Schuler, Johannes; Krämer, Christine; Hildebrandt, Silvio; Steinhäußer, Reimund; Starick, Anja; Reutter, Michaela (2017): Kumulative Wirkungen des Ausbaus erneuerbarer Energien auf Natur und Landschaft: Ergebnisse des gleichnamigen F+E-Projekts (FKZ 3512 83 0200). BfN-Skripten; 463 [e]. Hg. v. Bundesamt für Naturschutz (BfN). Bonn: Deutschland / Bundesamt für Naturschutz (BfN). Online verfügbar unter http://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript463.pdf.
- Scognamiglio, Alessandra (2016): 'Photovoltaic landscapes': Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55, S. 629–661. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.072.
- Seidler, C.; Haase, H.; Blechinger, K.; Kändler, M.; Kamenz, J. (2013): Einfluss der Solarpaneele auf die Vegetationsentwicklung am Beispiel der Deponie Bautzen-Nadelwitz. TU Dresden. Online verfügbar unter http://cwh-ing.de/fileadmin/user_upload/uploads/2013/06/Seidler-et-al.-2013.pdf, zuletzt aktualisiert am 2013.
- solarpark de kwekerij (2020): Waarom is Solarpark de Kwekerij zo uniek? Online verfügbar unter https://nlsolarparkdekwekerij.nl/over-ons/, zuletzt geprüft am 13.08.2020.
- Stadt Helmstedt (Hg.) (2012): Lappwaldsee. Vom Tagebau zum Bade- und Freizeitsee wir planen länderübergreifend! Online verfügbar unter
 - https://web.archive.org/web/20160713130507/http://www.stadt-
 - helmstedt.de/cms/tourismus/lappwaldsee/index.html, zuletzt aktualisiert am 14.05.2020, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- Statistisches Bundesamt (Destatis): Statistisches Jahrbuch 2019, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- Stiftung Energie & Klimaschutz (2017): Umweltprojekte. Sonnenpark Berghülen. Online verfügbar unter https://www.energie-klimaschutz.de/projekte/umweltprojekte/, zuletzt geprüft am 13.08.2020.

- STK Nds. (2016): Leitbild einer nachhaltigen Energie- und Klimaschutzpolitik. Hg. v. Niedersächsische Staatskanzlei. Online verfügbar unter
 - https://www.stk.niedersachsen.de/startseite/presseinformationen/kabinett-beschliet-leitbild-einernachhaltigen-energie--und-klimaschutzpolitik-146011.html, zuletzt geprüft am 26.04.2020.
- Stoefer, Matthias; Burg, Nadine von der (2012): Biologisches Monitoring in den Solarparks Senftenberg II und III. Berichte 2011 und 2012.
- Stoefer, Matthias; Burg, Nadine von der; Deutschmann, Hagen (2013): Biologisches Monitoring in den Solarparks Senftenberg II und III. Bericht 2013.
- Stoefer, Matthias; Burg, Nadine von der; Deutschmann, Hagen; Raden, Frank (2014): Biologisches Monitoring in den Solarparks Senftenberg II und III. Bericht 2014.
- Südbeck, Peter; Andretzke, Hartmut; Fischer, Stefan; Gedeon, Kai; Schikore, Tasso; Schröder, Karsten; Sudfeldt, Christoph (Hrsg.) (2005): Methodenstandards zur Erfassung der Brutvögel Deutschlands. Randolfzell.
- Suuronen, Anna; Muñoz-Escobar, Christian; Lensu, Anssi; Kuitunen, Markku; Guajardo Celis, Natalia; Espinoza Astudillo, Pablo et al. (2017): The Influence of Solar Power Plants on Microclimatic Conditions and the Biotic Community in Chilean Desert Environments. In: *Environmental management* 60 (4), S. 630–642. DOI: 10.1007/s00267-017-0906-4.
- Száz, Dénes; Mihályi, Dávid; Farkas, Alexandra; Egri, Ádám; Barta, András; Kriska, György et al. (2016): Polarized light pollution of matte solar panels: anti-reflective photovoltaics reduce polarized light pollution but benefit only some aquatic insects. In: *J Insect Conserv* 20 (4), S. 663–675. DOI: 10.1007/s10841-016-9897-3.
- Thiele, J.; Wiehe, J.; Gauglitz, P.; Kraschewski, T.; Kluß, L.; Demuth, B. et al. (in Vorb.): Konkretisierung von Ansatzpunkten einer naturverträglichen Ausgestaltung der Energiewende, mit Blick auf strategische Stellschrauben. Bonn-Bad Godesberg (BfN-Skripten).
- Trancik, Jessika E.; Brown, Patrick; Jean, Joel; Kavlak, Goksin; Klemun, Magdalena; Edwards, Morgan et al. (2015): Technology improvement and emissions reductions as mutually reinforcing efforts: Observations from the global development of solar and wind energy. Hg. v. Energy Initiative Massachusetts Institute of Technology. Cambridge, zuletzt geprüft am 25.04.2019.
- Tröltzsch, Peter; Neuling, Eric (2013): Die Brutvögel großflächiger Photovoltaikanlagen in Brandenburg. In: *Vogelwelt* (134), S. 155–179.
- Turney, Damon; Fthenakis, Vasilis (2011): Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. In: *Renew Sust Energ Rev* 15 (6), S. 3261–3270. DOI: 10.1016/j.rser.2011.04.023.
- UBA (2018): Daten zur Umwelt Ausgabe 2018, Umwelt und Landwirtschaft. Hg. v. Umweltbundesamt (UBA). Online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/daten-zur-umwelt-2018-umwelt-landwirtschaft, zuletzt geprüft am 03.05.2020.
- Uldrijan, Dan; Chovancova, Svetlana; Winkler, Jan (2015): Regulation of vegetation on lands with photovoltaic power plants. In: Ondřej Polák, Radim Cerkal und Natálie Březinová Belcredi (Hg.): Proceedings of International PhD Students Conference, S. 88–92.
- UM BaWü: Hinweise zum Ausbau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Rundschreiben an die kommunalen Planungsträger. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- UM BaWü (2019): Freiflächensolaranlagen. Handlungsleitfaden. 1. Aufl. Hg. v. Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM). Stuttgart. Online verfügbar unter http://www.um.baden-wuerttemberg.de/, zuletzt geprüft am 26.04.2020.
- United Nations Conference on Environment & Development (UNCED) (Hg.) (1992): Agenda 21. Rio Declaration. United Nations Conference on Environment & Development.
- Valle, B.; Simonneau, T.; Sourd, F.; Pechier, P.; Hamard, P.; Frisson, T. et al. (2017): Increasing the total productivity of a land by combining mobile photovoltaic panels and food crops. In: *Applied Energy* 206, S. 1495–1507. DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.113.

- Vartiainen, Eero; Masson, Gaëtan; Breyer, Christian; Moser, David; Román Medina, Eduardo (2019): Impact of weighted average cost of capital, capital expenditure, and other parameters on future utility-scale PV levelised cost of electricity. In: *Prog Photovolt Res Appl.* DOI: 10.1002/pip.3189.
- VDMA Photovoltaic Equipment (Hg.) (2020): International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV). Eleventh Edition. 11. Aufl., zuletzt geprüft am 13.05.2020.
- Vespalcova, Tereza; Chovancova, Svetlana; Winkler, Jan (2015): Evaluation of vegetation on lands with photovoltaic power plants. In: Ondřej Polák, Radim Cerkal und Natálie Březinová Belcredi (Hg.): Proceedings of International PhD Students Conference, S. 93–98.
- Visser, E. (2016): The impact of South Africa's largest photovoltaic solar energy facility on birds in the Northern Cape, South Africa. Dissertation. University of Cape Town.
- Wagegg, Jasmin; Trumpp, Silke (2015): Freiflächen-Solaranlagen und Naturschutz Eingriff oder Verbesserung im Vergleich zur Landwirtschaft. In: *NuR* 37 (12), S. 815–821. DOI: 10.1007/s10357-015-2926-2.
- Walter, Anna; Wiehe, Julia; Schlömer, Gerrit; Hashemifarzad, Ali; Wenzel, Tim; Albert, Ingrid et al. (2018): Naturverträgliche Energieversorgung aus 100 % erneuerbaren Energien 2050. Bonn (BfN-Skripten, 501).
- Warren-Kretzschmar, Barty (2011): Visualization in Landscape Planning: Choosing appropriate visualization methods for public participation. Dissertation. Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover. Online verfügbar unter https://doi.org/10.15488/7776, zuletzt geprüft am 07.05.2020.
- Wenzel, Tim (2017): Landschaftswirksamkeit von Agrophotovoltaikanlagen. Eine Methodik zur Abschätzung der Wirkung auf Landschaftsfunktionen. Masterarbeit. Leibniz Universität Hannover, Hannover. Institut für Umweltplanung.
- Weselek, Axel; Ehmann, Andrea; Zikeli, Sabine; Lewandowski, Iris; Schindele, Stephan; Högy, Petra (2019): Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. In: *Agron. Sustain. Dev.* 39 (4), S. 545. DOI: 10.1007/s13593-019-0581-3.
- Weyberg, S. (2019): Ernteerträge koventioneller Landwirtschaft in Niedersachsen. Landesverband Erneuerbare Energien, 2019. mündliche Mitteilung.
- Wiegand, C.; Platte, H.; Rohr, A.; Günnewig, D.; Johannwerner, E.; Michalczyk, J. (2017): Landesweite Erfassung, Darstellung und Bewertung der niedersächsischen Kulturlandschaften sowie historischer Kulturlandschaften landesweiter Bedeutung im Rahmen der Neuaufstellung des Niedersächsischen Landschaftsprogramms. Hg. v. Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz (NLWKN). Hannover.
- ZfK (2018): SW Bamberg überdachen PKW-Parkplatz mit PV-Anlage. In: *Zeitung für kommunale Wirtschaft*, 12.11.2018. Online verfügbar unter https://www.zfk.de/energie/strom/artikel/b5283c841d5ce05d69d00225810c4c6f/sw-bamberg-ueberdachen-pkw-parkplatz-mit-pv-anlage-2018-11-12/, zuletzt geprüft am 15.05.2020.
- ZSW; Bosch & Partner (2019): Abschlussbericht. Vorbereitung und Begleitung bei der Erstellung eines Erfahrungsberichts gemäß § 97 Erneuerbare-Energien-Gesetz. Teilvorhaben II c: Solare Strahlungsenergie. Hg. v. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW) und Bosch & Partner GmbH.

11 Gesetzestexte und Verordnungen

Billigkeitsrichtlinie Nordische Gastvögel - Acker (noGa-Acker): Richtlinie über die Gewährung von Billigkeitsleistungen zur Minderung von durch Rastspitzen nordischer Gastvögel verursachter Ertragseinbußen auf landwirtschaftlich genutzten Ackerflächen vom 09.01.2019 (Nds. MBI. Nr. 14/2019 S.621).

Bundes-Bodenschutzgesetz (BBodSchG): Gesetz zum Schutz vor schädlichen Bodenveränderungen und zur Sanierung von Altlasten vom 17.03.1998, BGBl. I S. 502, zuletzt geändert am 27. September 2017, BGBl. I S. 3465, 3505.

Bundesnaturschutzgesetz (BNatSchG): Gesetz zur Neuregelung des Rechts des Naturschutzes und der Landschaftspflege vom 29. Juli 2009, BGBI. I S. 2542-2579, zuletzt geändert am 4. März 2020; BGBI. I S. 440.

Bundeswaldgesetz (BWaldG): Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft vom 2.05.1975 (BGBI. I, S. 1037), zuletzt geändert am 17. Januar 2017; (BGBI. I S. 75).

Bundeswasserstraßengesetz (WaStrG 2018) vom 23. Mai 2007, BGBI. I S. 962; 2008 I S. 1980, zuletzt geändert am 29. November 2018, BGBI. I S. 2237.

Fauna-Flora-Habitat-Richtlinie (FFH-RL): Richtlinie Nr. 92/43/EWG zur Erhaltung der natürlichen Lebensräume sowie der wildlebenden Tiere und Pflanzen vom 21.05.1992 (ABI. L 206 S.7).

Hochwasserrisikomanagement-Richtlinie (HWRM-RL): Richtlinie 2007/60/EG über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken vom 23. Oktober 2007 (ABI. EU Nr. L 288/27).

SUP-Richtlinie: Nr. 2001/42/EG über die Prüfung der Umweltauswirkungen bestimmter Pläne und Programme vom 27. Juni 2001 (ABI. L 197 S. 30).

Vogelschutzrichtlinie: Richtlinie Nr. 79/409/EWG über die Erhaltung der wildlebenden Vogelarten vom 2. April 1979 (ABI. L 103 S. 1).

Wasserhaushaltsgesetz (WHG): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts vom 27.07.1957 (BGBI. I, S. 1110), zuletzt geändert am 4. Dezember 2018; BGBI. I S. 2254, 2255.

Anhang

- Anhang A: Vergrößerte Ansicht der Flächenverteilung der RWS-Klassen
- Anhang B: In Niedersachsen gefährdete Vogelarten des Offenlandes, die PV-FFA nachweislich zur Nahrungssuche (hellgrün hinterlegt) oder als Bruthabitat (dunkelgrün hinterlegt) nutzen
- Anhang C: In Niedersachsen gefährdete Vogelarten des Offenlandes, für die eine Experteneinschätzung der potenziellen Beeinträchtigung durch PV-FFA durchgeführt wurde
- Anhang D: Visualisierungen der Lenné 3D GmbH
- Anhang E: Gutachten zur Auswirkung von PV-Ausbau auf landwirtschaftliche Pachtpreise in Niedersachsen. Hardeweg, B. & Hübner, S. (2020)
- Anhang F: Juristisches Kurzgutachten: Bedingungen für Freiflächen-Photovoltaik in Niedersachsen nach Erneuerbare-Energien- und Raumordnungsrecht. Longo, F. (2020)

Anhang A: Vergrößerte Ansicht der Flächenverteilung der RWS-Klassen

Abb. 1: Flächen mit sehr hohem RWS

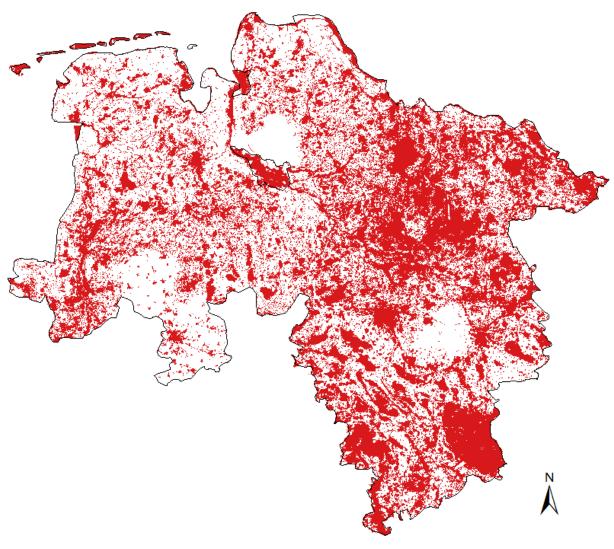


Abb. 2: Flächen mit hohem RWS

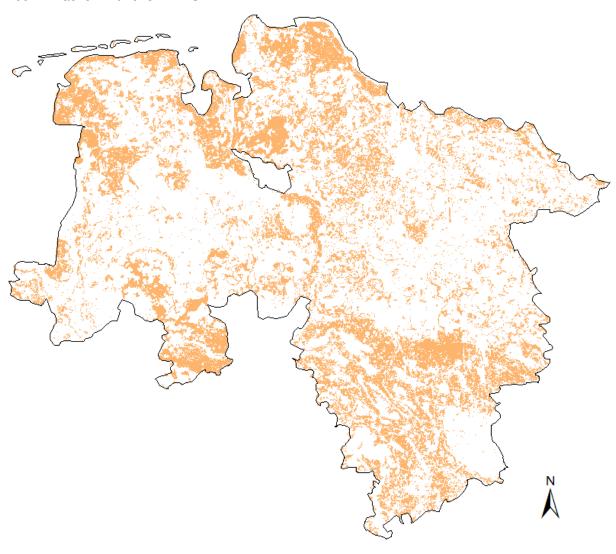


Abb. 3: Flächen mit mittlerem RWS

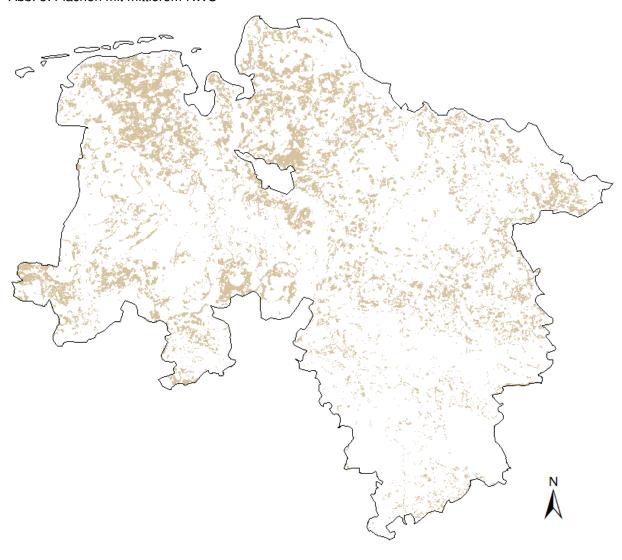


Abb. 4: Flächen mit geringem RWS

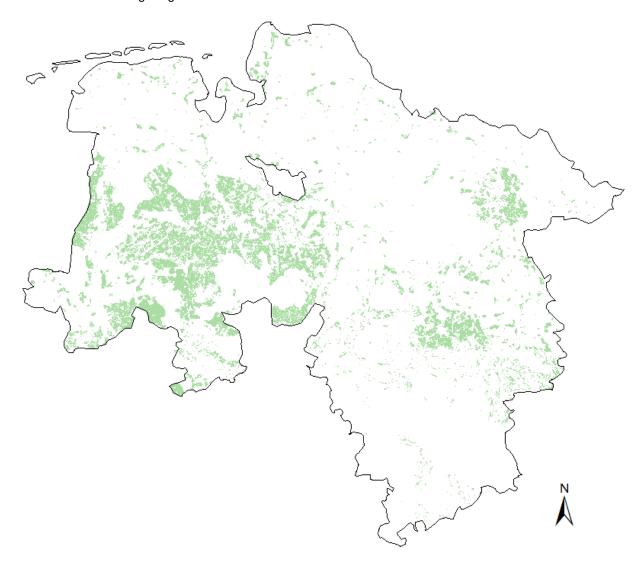
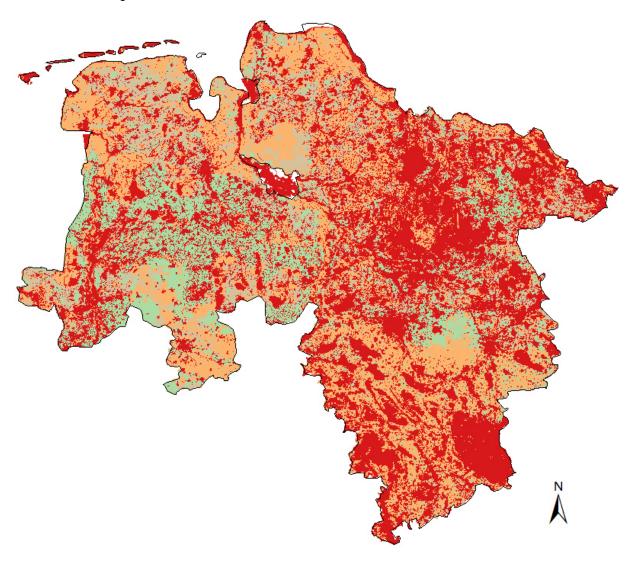


Abb. 5: Darstellung aller RWS-Klassen in Niedersachsen



Anhang B: In Niedersachsen gefährdete Vogelarten des Offenlandes, die PV-FFA nachweislich zur Nahrungssuche (hellgrün hinterlegt) oder als Bruthabitat (dunkelgrün hinterlegt) nutzen

	100					,			
Art	חסום					-			
	Liste	Tröltzsch &	Noiling		Ctorford	Cto for ot o	Liboror of o	Lieder &	Knipfer und
	2015	Neuling 2013	2009	Herden et al. 2009	2013	2014	2014	Lumpe 2012	Raab 2013, Raab 2015
Knäkente Anas	2								
querquedula	_								
Löffelente <i>Anas</i>	6								
Moohtol Coturnix	1	buewhoardy			wahrechainlichar	wahrechainlicher			
wacntei <i>Coturnix</i> [c.] coturnix	>	als Brutvogel			Brutvogel	Brutvogel			
Rebhuhn Perdix				Brutvogel					Brutvogel
[p.] perdix	7)
				Nahrungsgast,					
Graureiher Ardea				Ansitz und					
[c.] cinerea	>			Nahrungssuche					
	>			neben Modulen					
Weißstorch									
Ciconia [c.] ciconia	3								
Wiesenweihe									
Circus pygargus	7								
Rohrweihe Circus					Nahrungsgast	Nahrungsgast			
[a.] aeruginosus	>								
Rotmilan Milvus								Nachweis	Nahrungs-
milvus	7								gast
Baumfalke Falco						Nahrungsgast			
subbuteo	က								
Turmfalke Falco				Nahrungsgast,			Nahrungsgast	Nachweis	Nachweis
[t.] tinnunculus	>			Ansitz auf Modulen					
Wachtelkönig Crex									
crex	7								
Tüpfelsumpfhuhn									
Porzana porzana	7								

•	Rote				Quellen	en			
TA .	Liste 2015	Tröltzsch & Neuling 2013	Neuling 2009	Herden et al. 2009	Stoefer et al. 2013	Stoefer et al. 2014	Hübner et al. 2014	Lieder & Lumpe 2012	Knipfer und Raab 2013, Raab 2015
Kiebitz Vanellus vanellus	က							Nachweis	
Großer Brachvogel <i>Numenius</i> arquata	7								
Uferschnepfe Limosa limosa	7								
Bekassine Gallinago [g.] gallinago	-						Nahrungsgast		
Rotschenkel Tringa totanus	2								
Kampfläufer Philomachus pugnax	-								
Turteltaube Streptopelia turtur	2	verschwand als Brutvogel		vermutlicher Brutvogel, Ansitz neben Modulen			Brutverdacht		
Kuckuck Cuculus canorus Steinkauz	က								
Athene noctua	က								
Neuntöter <i>Lanius</i> [cristatus] collurio	က	Teilsiedler		Nahrungsgast	wahrscheinlicher Brutvogel	wahrscheinlicher Brutvogel	Nahrungsgast	Nachweis	Brutvogel
Raubwürger Lanius [e.] excubitor	1				gesicherter Brutvogel	Nahrungsgast			
Haubenlerche <i>Galerida cristata</i>	-								

ţ	Rote				Quellen				
Ĭ	Liste								Knipfer
	2015	Tröltzsch & Neuling 2013	Neuling 2009	Herden et al. 2009	Stoefer et al. 2013	Stoefer et al. 2014	Hübner et al. 2014	Lieder & Lumpe 2012	Raab 2013, Raab 2015
Heidelerche Lullula arborea	>	Brutvogel	Brutvogel in direkt angrenzenden P u E-Zone		wahrscheinlicher Brutvogel	gesicherter Brutvogel	Brutnachweis	Nachweis	
Feldlerche <i>Alauda</i> arvensis	က	Brutvogel	Brutvogel in direkt angrenzenden P u E-Zone	Brutvogel, Ansitz auf Modulen, Ansitz und Nahrungssuche unter Modulen, Ansitz neben	gesicherter Brutvogel	gesicherter Brutvogel	Brutverdacht	Nachweis	Nachweis
Rauchschwalbe Hirundo [r.] rustica	က	Brutvogel in Sonderstrukturen (Nistkästen, Flugzeughallen)		Nahrungsgast, Ansitz neben Modulen und Überfliegend	Nahrungsgast			Nachweis	Nachweis
Feldschwirl Locustella naevia	3								
Gelbspötter Hippolais [i.] icterina	^				wahrscheinlicher Brutvogel	möglicher Brutvogel			
Gartengrasmücke Sylvia borin	^				er	wahrscheinlicher Brutvogel			Nachweis
Sperbergrasmücke Sylvia nisoria	-				Nahrungsgast, möglicher Brutvogel	wahrscheinlicher Brutvogel			

***	Rote				Quellen				
ŧ	Liste 2015	Tröltzsch & Neuling 2013	Neuling 2009	Herden et al. 2009	Stoefer et al. 2013	Stoefer et al. 2014	Hübner et al. 2014	Lieder & Lumpe 2012	Knipfer und Raab 2013, Raab 2015
Star <i>Sturnus [v.]</i> vulgaris	3			Nahrungsgast, Ansitz auf Modulen, Nahrungssuche unter Modulen, überfliegend	Nahrungsgast		Nahrungsgast	Nachweis	Nachweis
Braunkehlchen Saxicola [r.] rubetra	8	vermutlicher Brutvogel	Brutvogel in angrenzender P u E-Zone	Durchzügler, Ansitz neben Modulen	Nahrungsgast				
Sprosser <i>Luscinia</i> [l.] luscinia	æ								
Gartenrotschwanz Phoenicurus phoenicurus	>								
Feldsperling <i>Passer</i> montanus	>			Nahrungsgast, Ansitz auf Modulen, Ansitz/ Nahrungssuche unter Modulen, Ansitz neben Modulen					Brutvogel
Baumpieper Anthus trivialis	>			Brutvogel, Ansitz auf und neben Modulen		gesicherter Brutvogel	Brutverdacht	Nachweis	Brutvogel
Wiesenpieper Anthus pratensis	3			Durchzügler, Ansitz auf/neben Modulen	Durchzügler			Nachweis	
Girlitz Serinus serinus	۸						Brutverdacht		
Stieglitz Carduelis [c.] carduelis	۸			Nahrungsgast, Ansitz neben Modulen	Nahrungsgast	Nahrungsgast	Nahrungsgast	Nachweis	Nachweis
Bluthänfling <i>Carduelis [c.]</i> <i>cannabina</i>	8	Brutvogel		vermutlicher Brutvogel, Ansitz auf Modulen, Ansitz und Nahrungssuche unter Modulen, Ansitz neben Modulen	gesicherter Brutvogel	möglicher Brutvogel	Nahrungsgast	Nachweis	Brutvogel

**	Rote				Quellen				
Ĭ	Liste	Tröltzsch &						l jeder &	Knipfer
	2015	Neuling 2013	Neuling 2009	Herden et al. 2009	Stoefer et al. 2013	Stoefer et al. 2014	Hübner et al. 2014	Lumpe 2012	und Raab 2013, Raab 2015
Grauammer <i>Emberiza</i> calandra	,	verschwand als Brutvogel			wahrscheinlicher Brutvogel	gesicherter Brutvogel		Nachweis	
Goldammer Emberiza [c.] citrinella		Brutvogel	Brutvogel in direkt angrenzenden P u E-Zone	Brutvogel, Ansitz und Nahrungssuche auf Modulen, Ansitz und Nahrungssuche unter Modulen, Ansitz und	wahrscheinlicher Brutvogel	gesicherter Brutvogel	Nahrungsgast Nachweis		Brutvogel
	>			Nanrungssucne neben Modulen					
Ortolan Emberiza [h.] hortulana	7								

Anhang C: In Niedersachsen gefährdete Vogelarten des Offenlandes, für die eine Experteneinschätzung der potenziellen Beeinträchtigung durch PV-FFA durchgeführt wurde

Art	Rote Liste	Lebensraum (Südbeck et al. 2005)	Brutbiologie (Südbeck et al. 2005)	Eigene Einschätzungen anhand Lebensraum und Brutbiologie (Südbeck et al 2005)
	2015		c. c	
Knäkente <i>Anas</i> <i>querquedula</i>	1	eutrophe, flache Gewässer	Bodenbrüter	Nicht relevant, da Fläche vorher wahrscheinlich nicht als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche genutzt wurden.
Löffelente <i>Anas [c.]</i> clypeata	2	eutrophe, flache Gewässer	Bodenbrüter	Nicht relevant, da Fläche vorher wahrscheinlich nicht als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche genutzt wurden.
Weißstorch <i>Ciconia [c.]</i> ciconia	3	Siedlungsbewohner mit Nahrungshabitaten in Niederungslandschaften	Freibrüter, Nest hoch auf Gebäuden o.ä.	Als Bruthabitat nicht relevant, zur Nahrungssuche wahrscheinlich außerhalb der Module nutzbar.
Wiesenweihe <i>Circus</i> pygargus	2	großräumige Niederungslandschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat nicht relevant, zur Nahrungssuche möglicherweise außerhalb der Module nutzbar.
Wachtelkönig Crex crex	7	großräumige, offene bis halboffene Niederungslandschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat und zur Nahrungssuche wahrscheinlich nutzbar.
Tüpfelsumpfhuhn Porzana porzana	2	Verlandungszonen	Bodenbrüter	Nicht relevant, da Fläche vorher wahrscheinlich nicht als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche genutzt wurden.
Großer Brachvogel Numenius arquata	2	weitgehend offene Niederungslandschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat wahrscheinlich nicht, zur Nahrungssuche möglicherweise außerhalb der Module nutzbar.
Uferschnepfe <i>Limosa</i> <i>limosa</i>	2	weitgehend offene Niederungslandschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche wahrscheinlich nicht nutzbar.
Rotschenkel <i>Tringa</i> totanus	2	Küstengebiete an Nord- und Ostsee	Bodenbrüter	Als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche wahrscheinlich nicht nutzbar.
Kampfläufer <i>Philomachus pugnax</i>	1	großräumige, offene bis halboffene Niederungslandschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat oder zur Nahrungssuche wahrscheinlich nicht nutzbar.
Kuckuck <i>Cuculus</i> canorus	က	verschieden Lebensraumtypen	Brutschmarotzer	Als Bruthabitat und zur Nahrungssuche wahrscheinlich nutzbar.
Steinkauz <i>Athene</i> noctua	က	Kulturfolger	Höhlen- bzw. Halbhöhlenbrüter	Als Bruthabitat nicht relevant, zur Nahrungssuche wahrscheinlich außerhalb der Module nutzbar.

Art	Rote Liste 2015	Lebensraum (Südbeck et al. 2005)	Brutbiologie (Südbeck et al. 2005)	Eigene Einschätzungen anhand Lebensraum und Brutbiologie (Südbeck et al 2005)
Haubenlerche <i>Galerida cristata</i>	1	Trockene vegetationsarme Standorte	Bodenbrüter	Als Bruthabitat möglicherweise außerhalb der Module, zur Nahrungssuche wahrscheinlich nutzbar.
Feldschwirl Locustella naevia	က	Offenes bis halboffenes Gelände	Freibrüter	Als Bruthabitat und zur Nahrungssuche möglicherweise außerhalb der Module nutzbar.
Sprosser Luscinia [I.] luscinia	Œ	Gebüschzonen	Freibrüter	Als Bruthabitat und zur Nahrungssuche möglicherweise nutzbar.
Gartenrotschwanz Phoenicurus phoenicurus	^	Lichte aufgelockerte Altholzbestände	Halbhöhlen- auch Freibrüter	Als Bruthabitat möglicherweise, zur Nahrungssuche wahrscheinlich nutzbar.
Ortolan <i>Emberiza [h.]</i> hortulana	2	offene, aber strukturreiche Landschaften	Bodenbrüter	Als Bruthabitat wahrscheinlich außerhalb der Module, zur Nahrungssuche wahrscheinlich nutzbar.

Anhang D: Visualisierungen der Lenné 3D GmbH

Zevener Geest



Beispiellandschaft Zevener Geest



Referenzanlage Zevener Geest



Flächenertragsoptimiert Zevener Geest



Winterertragsoptimiert Zevener Geest



APV-Typ "Heggelbach" Zevener Geest



APV-Typ "Weihenstephan" Zevener Geest



APV-Typ "Dirmlingen" Zevener Geest



Referenzanlage grün, Zevener Geest



Referenzanlage mit Zaun, Zevener Geest



Winterertrags optimiert grün, Zevener Geest

Bersenbrücker Land



Beispiellandschaft Bersenbrücker Land



Referenzanlage Bersenbrücker Land



Flächenertragsoptimiert Bersenbrücker Land



Winterertragsoptimiert Bersenbrücker Land



APV-Typ "Heggelbach" Bersenbrücker Land



APV-Typ "Weihenstephan" Bersenbrücker Land



APV-Typ "Dirmlingen" Bersenbrücker Land

Innerste Bergland



Beispiellandschaft Innerstebergland



Referenzanlage Innerstebergland



Flächenertragsoptimiert Innerstebergland



Winterertragsoptimiert Innerstebergland



APV-Typ "Heggelbach" Innerstebergland



APV-Typ "Weihenstephan" Innerstebergland



APV-Typ "Dirmlingen" Innerstebergland

Ostfriesische Seemarschen



Beispiellandschaft Ostfriesische Seemarschen



Referenzanlage Ostfriesische Seemarschen



Flächenertragsoptimiert Ostfriesische Seemarschen



Winterertragsoptimiert Ostfriesische Seemarschen



APV-Typ "Heggelbach" Ostfriesische Seemarschen



APV-Typ "Weihenstephan" Ostfriesische Seemarschen



APV-Typ "Dirmlingen" Ostfriesische Seemarschen





am Institut für Biologische Produktionssysteme der Leibniz Universität Hannover Herrenhäuser Str. 2 · 30419 Hannover · Tel. 0511-762-5409

Projekt INSIDE

Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft

Gutachten im Auftrag des ISFH und des Instituts für Umweltplanung Leibniz Universität Hannover

Sabine Hübner Dr. Bernd Hardeweg

Zentrum für Betriebswirtschaft im Gartenbau e.V. (ZBG) Herrenhäuser Straße 2 30419 Hannover

Kontakt: Sabine Hübner +49228 9086795 huebner@zbg.uni-hannover.de

Hannover, März 2020

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
	1.1 Photovoltaik in Deutschland	5
	1.2 Freiflächen-PV oder Agrophotovoltaik (APV)	7
	1.3 Bau von Freiflächen-Photovoltaik Anlagen: Gesetzliche Bestimmungen	8
	1.4 Potentialanalysen für Freiflächen-Photovoltaik	9
	1.5 APV-Systeme in der Praxis: Beispiele aus anderen Ländern	. 10
	1.5.1 Japan	. 10
	1.5.2 Italien	
	1.5.3 USA	
2 (1.6.4 Andere Länder	
_	2.1 Wachstumsmodell Pflanze	
	2.1.1 Einfluss abiotischer Faktoren im Freilandanbau	
	2.1.3 Wachstumsfaktor Licht	
	2.1.3 Einfluss von Stress durch Umweltfaktoren	
	2.1.4 Lichtmangel/-überschuss als Stressfaktor	. 18
	2.2 Studienlage und Literatur zu Auswirkungen von Lichtmangel	. 19
3.	Landwirtschaftliche Anbausysteme	. 20
	3.1. Fruchtfolge	. 20
	1.7 Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE)	. 23
	1.8 Landwirtschaftsstruktur in Niedersachsen	. 24
	3.3. Landwirtschaftliche Kulturen in Niedersachsen	. 26
	3.3.2 Verteilung nach Landkreisen	. 28
	3.4 Hauptkulturen in Niedersachsen	. 29
	3.4.1 Kartoffeln	. 29
	3.4.2 Mais	. 32
	3.4.3 Zuckerüben	. 35
	3.4.4. Raps	
	3.4.5 Winterweizen	
	3.5 Eignung von landwirtschaftlichen Sonderkulturen	. 42
	3.5.1. Kulturheidelbeeren	
	3.5.2 Spargel	
	3.5.3 Erdbeeren	
	3.6. Ergebnisse der Untersuchungen	
4 7	Zusammenfassung	. 50
5	-azit	50

Abbildung 1: Installierte Leistung Photovoltaik in Niedersachsen	6
Abbildung 2: Next 2 SUN APV-Anlage in Donaueschingen-Aasen	8
Abbildung 3: APV-Anlagen in Japan	10
Abbildung 4: APV-Anlage in Minamisoma City	11
Abbildung 5: APV-Anlage in Tsukuba City, Japan Anbau von Koreanischem Ginseng Ginseng	11
Abbildung 6: APV-Anlage in Tsukuba City, Japan	11
Abbildung 7: APV-Anlage von rem tec, Italien	12
Abbildung 8: APV-Anlage der University of Massachusetts, USA	13
Abbildung 9: APV-Anlage über Wein, Rians, Frankreich	14
Abbildung 10: Einfluss biotischer und abiotisicher Faktoren auf Pflanzen	15
Abbildung 11: Einfluss der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) auf den Biomasse- Ertrag	von
Kulturpflanzen	17
Abbildung 12: Eignung von Kulturpflanzen für den Anbau unter APV-Anlagen	20
Abbildung 13: Geeignete Vor- und Nachfrüchte in landwirtschaftlichen Kulturen	21
Abbildung 14: Eignungsflächen für FF-PV-Anlagen, Top-10 Landkreise in Niedersachsen	23
Abbildung 15: Geeignete Landkreise für den Ausbau von FF-PV-Anlagen	23
Abbildung 16: Gebietskulisse Grundwasser- Nitratkulisse und Oberflächenwasser, Phosphatku	lisse
"Rote Gebiete"	
Abbildung 17: Landnutzung in Niedersachsen	25
Abbildung 18: Globalstrahlung in Deutschland 1981-2010	26
Abbildung 19: Globalstrahlung in Deutschland 2018	26
Abbildung 20: Ackerbauliche Hauptkulturen in Niedersachsen (in 1.000 ha)	27
Abbildung 21: Sonderkulturflächen in Niedersachsen 2016 (in ha)	27
Abbildung 22 : Anteile landwirtschaftlicher Kulturen an der Ackerfläche nach Landkreisen (in % an	ı der
gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche)	28
Abbildung 23: Regionale Verteilung der Anbauflächen für Kartoffeln in Niedersachsen 2016	29
Abbildung 24: Regionale Verteilung der Anbauflächen für Silo/Grünmais in Niedersachsen 2016	
Abbildung 25: Regionale Anbauflächen für Körnermais in Niedersachsen 2016	34
Abbildung 26: Regionale Verteilung der Anbauflächen von Winterweizen in Niedersachsen 2016	38
Abbildung 27: Regionale Verteilung der Anbauflächen von Wintergerste in Niedersachsen 2016	
Abbildung 28 : Regionale Verteilung der Anbauflächen von Kulturheidelbeeren in Niedersachsen 2	2016
	43
ADDITION OF DESCRIPTION OF THE STATE OF THE	
Abbildung 29: Regionale Verteilung von Anbauflächen von Spargel in Niedersachsen 2016 Abbildung 30: Regionale Verteilung der Anbauflächen von Erdbeeren in Niedersachsen 2016	

1 Einleitung

Die angestrebte Energiewende, der Ausstieg aus der Atomkraft und aus der Kohle, macht es notwendig, den Ausbau der erneuerbaren Energien in den kommenden Jahren voranzubringen. Hier ist besonders die Photovoltaik gefragt, da sie schnell und kostengünstig errichtet werden kann und bislang auf eine hohe Akzeptanz in der in der Gesellschaft trifft (Wirth, 2020).

Das Klimaschutzprogramm 2030 sieht einen Ausbau der Photovoltaik bis 2030 auf eine installierte Erzeugungsleistung von 98 GW vor. Der Anteil von Strom aus erneuerbaren Energien am gesamtem Stromverbrauch soll 2030 bei einem Anteil von 65% liegen (Bundesregierung, 2019; Klimaschutzprogramm 2030). Andere Studien kommen zu weitaus höheren Ausbauzielen. Nach verschieden Studien sollen 120 bis zu 301 GW notwendig sein, um einen steigenden Stromverbrauch und eventuelle Stromlücken zu schließen (Wirth, 2020).

Das Institut EUPD Research geht in ihrer Studie von einem deutlich steigenden Strombedarf aus (für 2030 ein Plus von 20%, 2040 ein Plus von 66% gegenüber 2018). Notwendig wären nach ihren Berechnungen ein Ausbau bis auf 162 GW im Jahr 2030 und bis auf 252 GW 2040. Damit wäre ein deutlich höherer jährlicher Zubau notwendig (bis zu 12 GW ab 2023) als im politisch vorgesehen Rahmen (4,9 GW in den nächsten 10 Jahren) (EUPD, 2019).

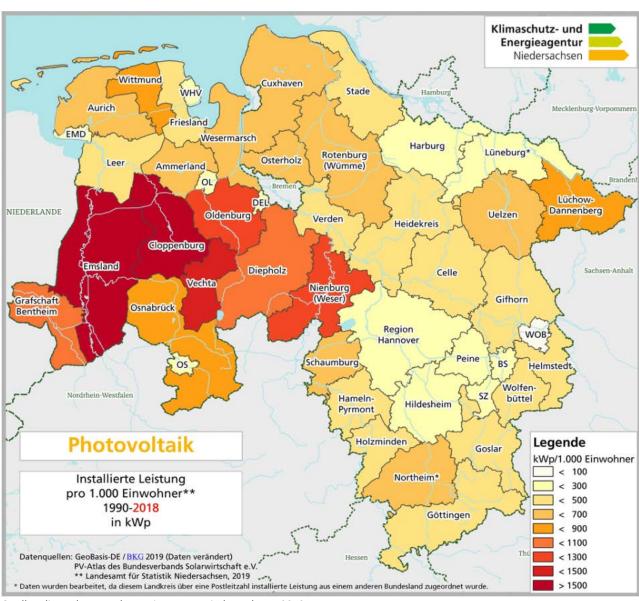
Allgemein wird der Zubau der Photovoltaik von der Entwicklung der Strompreise und Vergütungssätze sowie der Kosten für Module und Gesamtkonzepte, z. B. in Verbindung mit Speichern zur Eigenbedarfsdeckung, abhängen. Im Bereich der Freiflächenphotovoltaik können durch die Flächennutzungskonkurrenz auch die gesellschaftliche Akzeptanz und genehmigungsrechtliche Hindernisse den Erfolg beeinflussen.

1.1 Photovoltaik in Deutschland

2019 deckte die PV mit einer Stromerzeugung in Höhe von 46,5 TWh 8,2 % des Bruttostromverbrauches in Deutschland. Alle Erneuerbaren Energien zusammen kamen auf einen Anteil von 43% am Bruttostromverbrauch. Ende 2019 lag die installierte Leistung aus Photovoltaik-Anlagen in Deutschland bei 49,7 GW, die sich auf über 1,7 Mio. Anlagen verteilten (Wirth, 2020). Die Zubauraten sind in den letzten Jahren deutlich gestiegen. 2019 wurden nach vorläufigen Angaben 3.944 MW neu installiert. Am stärksten ausgebaut wurde die Photovoltaik in Bayern mit einer Zubaurate von 919,5 MW für 2019. In Niedersachsen lag die Rate bei 319,4 MW (solarbranche.de, nach Daten des BNetzA-Markstammdatenregisters).

In Niedersachsen lag die installierte Leistung Photovoltaik in 2018 bei 3.930 MW, davon waren 552 MV (14%) auf Freiflächen installiert und 3.355 MV (86%) auf Dachflächen. 2018 lag der Zubau bei 192 MW, davon wurden 183 MV auf Dachflächen und 9,1 MW auf Freiflächen (FPV) installiert. 2019 kamen noch einmal 319,4 MV dazu, so dass Ende 2019 der Ausbau bei rund 4.250 MW lag (Solarbranche, 2020 (a), Agentur für erneuerbare Energien, 2020)

Abbildung 1: Installierte Leistung Photovoltaik in Niedersachsen



Quelle: Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen, 2019

Die Abbildung 1 zeigt die Verteilung der installierten Leistung an Photovoltaik je 1.000 Einwohner heruntergebrochen auf Landkreisebene. Bei der Pro-Kopf-Verteilung der insgesamt in Niedersachsen installierten Photovoltaik-Leistung wird eine Dominanz der ländlich geprägten Landkreise wie etwa Cloppenburg, Emsland und Vechta mit jeweils etwa 1,5 Kilowatt pro Einwohner gegenüber Städten mit etwa 100 bis 300 Watt pro Einwohner deutlich (Stand Ende 2018). Dies ist einerseits auf die größere verfügbare private Dachfläche pro Einwohner zurückzuführen (größerer Anteil an Ein- und Zweifamilienhäusern in ländlichen Gebieten), andererseits auch auf eine häufige Nutzung von Dachflächen landwirtschaftlich genutzter Gebäude sowie von Freiflächen in ländlichen Gebieten. (Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen, 2019). Viele Landwirte haben schon in den 2010er Jahren Photovoltaik als ein Standbein der Energieproduktion in ihren Betrieben eingeführt. Auch heute ist die Energieproduktion in Form der Photovoltaik für Landwirte interessant, auf Dächern, aber auch insbesondere auf Freiflächen, u.a. weil sowohl der Ausbau der Windenergie als auch der Neubau von Biogasanlagen zurzeit ins Stocken geraten ist (Neumann, 2020).

1.2 Freiflächen-PV oder Agrophotovoltaik (APV)

Photovoltaik-Anlagen können auf freien Flächen (Freiflächenphotovoltaik) installiert werden. Bei Freiflächenanlagen wird die Fläche mit Modulen auf Trägersystemen bebaut. Zurzeit liegt die technische Kapazität bei ca. 1 MW pro ha mit in Zukunft weiter steigender Tendenz. (Niepelt et al., 2019), d.h. der Flächenverbrauch in ha pro MW ist in den vergangenen Jahren stark gesunken. Lag er 2010 im Durchschnitt noch bei 2,8 ha pro MW, werden pro MW nur noch 1 ha Fläche gebraucht bei Anlagen mit Stand der Technik (Kelm et al. (2019). So z.B. bei der Großanlage des Energieunternehmens EnBW in Brandenburg (siehe S. 10). Eine weitere landwirtschaftliche Nutzung der Fläche unter FF-PV –Anlagen ist aufgrund der starken Bebauung nur sehr eingeschränkt möglich, so zum Beispiel als Schafsweide. Die bebauten Flächen fallen aus Agrarförderung, d.h. es werden keine Direktzahlungen (Flächenprämien) für diese Flächen gezahlt.

Der Eigentümer verpachtet seine Fläche oftmals an einen Investor, der die Anlage finanziert und betreibt. Der Verpächter erhält zurzeit zwischen 800 bis 2.000 Euro Pacht pro ha und Jahr (Lichner, 2017). Der Bau von Freiflächenanlagen ist in den Bundesländern auf bestimmte Flächen beschränkt. (siehe Kapitel 1.3).

Die Entwicklung von sogenannten Agrarphotovoltaik-Anlagen (APV) soll eine Doppelnutzung der Fläche erlauben und einen Mehrertrag aus dem Ertrag aus der landwirtschaftlichen Produktion und dem Ertrag aus der Stromproduktion der Solarmodule erwirtschaften als bei einer alleinigen Nutzungsform. Dies soll langfristig die Flächenkonkurrenz, die zwischen landwirtschaftlicher und solarer Stromproduktion entstehen könnte bzw. regional schon vorhanden ist, entschärfen, mehr Fläche nutzbar machen und die Akzeptanz in der Bevölkerung aufrecht halten.

Die Agrophotovoltaik (APV) wird als Integriertes Food- and Energy System (Def. FAO 2014) definiert.

"Die APV-Systemtechnik ermöglicht die simultane landwirtschaftliche Haupterzeugung und (sekundäre) Solarstromproduktion auf derselben Fläche und versucht dabei Synergieeffekte und Potentiale beider Produktionssysteme optimal zu nutzen." (Trommsdorf, 2018). APV-Anlagen nutzen Synergieeffekte zwischen der Landwirtschaft und den PV-Systembetreibern, um bspw. die operativen Kosten (Betriebsführung und Instandhaltung) des PV-Systems und des landwirtschaftlichen Betriebs zu senken. Die simultane Landnutzung durch Energie- und Nahrungsmittelproduktion steigert die ökologische und ökonomische Landnutzungseffizienz (Luhmann et al. (2014).

Im besten Fall kommt es zu Synergieeffekten, von dem beide Systeme profitieren (zusätzlich zu den oben genannten: Kühlungseffekte durch eine landwirtschaftliche Nutzung der Flächen, die eine Leistungssteigerung der Module bewirken bzw. geringe Schäden durch Hagel, Sonnenbrand etc. an den landwirtschaftlichen Kulturen).

Es gibt zurzeit unterschiedliche APV-Systeme:

- 1. Feste, senkrecht aufgestellte, bifaziale Module in Reihenanordnung (O/W-Ausrichtung)
- 2. Feste Module auf Unterkonstruktion (mit Arbeitshöhe ab 5m, weiten Abstände zwischen den Ständern, um Maschineneinsatz zu gewährleisten)

In Deutschland wurden Flächen mit festen, senkrecht aufgestellten Modulen in Reihenanordnungen bebaut (siehe Infokasten Seite 8). Systeme mit Überbau gibt es zurzeit als Pilotanlage des Fraunhofer Instituts in Heggelbach am Bodensee (Trommsdorff, 2018, Weselek et al., 2019). Weitere Versuchsanlagen sind in Planung.

In anderen Ländern wie in Japan und Italien sind APV-Anlagen im kommerziellen Einsatz (siehe Überblick in Kap1.5) als Kleinanlagen, aber auch im größeren Maßstab.

Beispielanlage Donaueschingen-Aasen

Aufbau: Senkechte bifaziale Module in Reihenanordnung in Nord-Süd-Ausrichtung (Einstrahlung

Ost-West). Senkrecht in Reihen mit Abstand 20m.

Technische Leistung: 4,1 MWp auf einer Fläche von 14 ha

Investitionsvolumen: 3,2 Mio. Euro.

Bauherr: Next2Sun GmbH

Betreiber: Bürgersolarkraftwerke Donaueschingen – Aasen GmbH Finanzierung: Solverde Bürgerkraftwerke Energiegenossenschaft

Bodeneigentümer: Mehrere Landwirte und andere Personen (Pachtzahlung)

(Quelle: Solarbranche, 2020 (b))

Abbildung 2: Next 2 SUN APV-Anlage in Donaueschingen-Aasen



Quelle: solarbranche.de (b)

1.3 Bau von Freiflächen-Photovoltaik Anlagen: Gesetzliche Bestimmungen

Der Bau von Photovoltaik-Anlagen auf Freiflächen (FF-PV-Anlagen) wird in Deutschland staatlich gefördert, die Förderregeln sind im Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) von 2017 geregelt. Danach ist der Bau von FF-PV-Anlagen nur auf bestimmten Flächen erlaubt, wenn eine Förderung nach EEG (Einspeisevergütung) erfolgen soll. Erlaubt ist der Bau von FF-PV-Anlagen laut dem Erneuerbare Energien Gesetz von 2017 u.a. auf folgenden Flächen:

- baulichen Anlagen (alte Deponien etc.)
- Konversionsflächen (Industriebrachen, Militärische Flächen)
- Acker- und Grünlandflächen entlang von Autobahnen und Schienen (Korridor 110 m)
- bereits versiegelte Flächen
- Flächen im Eigentum des Bunds oder der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben

(Quelle: BMJV, 2017)

Seit einiger Zeit ist der Bau von FF-PV-Anlagen auch ohne staatliche Fördergelder rentabel, wodurch die Flächensteuerung durch das EEG-Gesetz entfällt. Im März 2020 erfolgte in Brandenburg der Baustart des EnBW Solarparks Weesow-Willmersdorf mit einer Leistung von 187 MW auf einer Fläche von 164 ha. Die EnBW Energie Baden-Württemberg AG baut hier auf eigener Fläche, die früher landwirtschaftlich genutzt wurde, das erste PV-Großprojekt ohne EEG-Förderung (EnBW, 2020).

In einigen Bundesländern eröffnet die Länderöffnungsklausel des EEG Gesetzes seit 2017 die Möglichkeit, auch Acker – und Grünlandflächen in sogenannten "landwirtschaftlich benachteiligten Gebieten" für den Bau von FF-PV-Anlagen zu nutzen. In Bayern, Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, Hessen und dem Saarland wurde davon Gebrauch gemacht. In Bayern wurde die Förderung 2019 erweitert. Ab 2019 werden statt bislang 30 nun 70 FF-PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen zugelassen (Solarbranche,2020 (c)). In Baden-Württemberg ist die Zulassung auf 100 MW jährlich begrenzt.

In Niedersachsen ist der Bau von FF-PV-Freiflächenanlagen auf Acker- und Grünland nicht erlaubt, da "im Hinblick auf die zunehmenden Flächennutzungskonkurrenzen dem Schutz landwirtschaftlicher Flächen als unverzichtbarer Basis für die Nahrungs- und Futtermittelproduktion eine besondere Bedeutung zukommt. Photovoltaikanlagen, die im Außenbereich errichtet werden sollen, treten daher in Nutzungskonkurrenz zu landwirtschaftlichen Flächen, die als Vorbehaltsgebiete Landwirtschaft festgelegt und der landwirtschaftlichen Produktion vorbehalten sind. Es wird daher der Landwirtschaft angesichts des bereits hohen Flächenentzugs durch andere Nutzungen ein Vorrang gegenüber der Photovoltaiknutzung eingeräumt." (Niedersächsische Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz, 2014).

Der Deutsche Bauerverband lehnt eine Zulassung von Acker-und Grünlandflächen für die Bebauung mit FF-PV-Anlagen aus den gleichen Gründen ab, während der Bayerische Bauernverband die Nutzung von Agrarflächen in benachteiligten Gebieten mit Einschränkungen befürwortet. Er will den Ausbau vor allem von dezentralen kleinen, standortangepassten und in die bayerische Kulturlandschaft passende FF-PV-Anlagen, die sich in der Hand der Landwirtschaft befinden, unterstützt sehen. Aus seiner Sicht hat sich die Photovoltaik für viele bayerische Bauernfamilien zu einem wichtigen Standbein entwickelt und würde einen vor dem Hintergrund volatiler Agrarmärkte einen stabilisierenden Einkommensbeitrag leisten. (Bayerischer Bauernverband, 2019).

1.4 Potentialanalysen für Freiflächen-Photovoltaik

Eine Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur aus dem Jahr 2015 schätzt das Flächenpotenzial für den Ausbau von Freiflächen-PV auf 3.164 km², was 0,9% der gesamten Fläche der Bundesrepublik entspricht. (BMIV Online Publikation, (2015). Bei einem Flächenverbrauch von 1 ha pro MW nach Stand der Technik (Niepelt et al., 2019) bieten diese Flächen ein technisches Potential von 316 GW.

Das Fraunhofer Institut schätzt die technischen Potenziale für FF-PV bei Einbeziehung von Agrophotovoltaik (APV) auf ein 1,7 TW, für Gebäudehüllen (Dächer und Fassaden) auf 1,4 TW. Weitere 55 GW wären aus der Nutzung von FPV (Floating –PV) auf Gewässern möglich.

Die Nutzung der technischen Potenziale hängt ab von ökonomischen, regulativen und technischen Randbedingungen ab, hinzukommen Fragen der Akzeptanz (Wirth, 2020).

1.5 APV-Systeme in der Praxis: Beispiele aus anderen Ländern

1.5.1 Japan

In Japan wird Agrophotovoltaik als "Solar sharing" bezeichnet. Seit einigen Jahren gibt es ein Förderprogramm des Ministry of Agriculture, Forestry and Fisheries (MAFF), das Anforderungen vorgibt. Die APV-Anlage muss einfach gebaut sein und darf keine Betonverankerungen aufweisen, damit ein einfacher Abbau möglich ist. Das Ständerwerk muss genügend Licht durchzulassen und Platz für den Einsatz von Maschinen gewährleisten. Die teilnehmenden Landwirte müssen einer staatlichen Stelle ihre Ernteergebnisse melden. Die Einspeisung des Stroms wird durch das Feed-in-Tariff (FIT) Scheme geregelt.

Ziel des Förderprogrammes ist die Generierung von Zusatzeinkommen für Landwirte aus der APV und somit ein Aufbau eines alternativen Standbeins. Zudem soll die Attraktivität einer Beschäftigung in der Landwirtschaft gesteigert werden, um Betriebsnachfolgen zu sichern und den Anteil an Haupterwerbslandwirten zu erhöhen.

Abbildung 3: APV-Anlagen in Japan





Quelle: http://www.ulicasolar.com/pro10.asp?webmu=4

In Japan gibt es auch einige größere APV-Anlagen unter denen landwirtschaftliche Kulturen angebaut werden. Angebaut werden an geringe Lichtverhältnisse angepasste Kulturen wie Ginseng, Ingwer und andere Gewürzpflanzen, aber auch andere Kulturpflanzen wie Reis, Erdnuss, Auberginen, Gurken, Tomaten, Kohl, Heidelbeeren, Sojabohnen uns Tee.

Minamisoma City, Fukushima Prefecture: Toyo Energy Farm Co Ltd. Größe: 11,3 MV auf 18,5 ha in mehreren Standorten. Aufbau von normal großen Panels mit Minimum-Höhe von 2,2m. Produktion von Japanischem Ingwer.

Abbildung 4: APV-Anlage in Minamisoma City



Quelle: Toyo Energy Farm

Mimori District, Tsukuba City auf Honshu, 60 km nördlich von Tokio:

SJ Solar Tsukuba Power Plant, Größe: 54 ha, 34 MW.

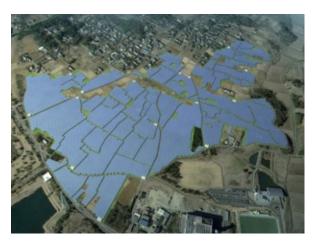
Japans größte "solar sharing power plant".

Produktion von koreanischem Ginseng, Ashibita (Japanischer Engelwurz, eine Gewürzpflanze). Koriander, sowie weiteren Gewürzpflanzen

Abbildung 5: APV-Anlage in Tsukuba City, Japan Abbildung 6: APV-Anlage in Tsukuba City, Japan Anbau von Koreanischem Ginseng



Quelle: Nikkei BP



Quelle:https://tech.nikkeibp.co.jp/dm/atclen/news_en/ 15mk/030601952/?SS=imgview_en&FD=1448633234

1.5.2 Italien

In Italien hat die Firma rem tec energy APV-Anlagen installiert. Seit Mai 2011 wurden in Norditalien drei mehrere Megawatt große APV-Anlagen von dem Unternehmen gebaut. Unter der Bezeichnung "Agrovoltaico" hat das Unternehmen eine Systemtechnik entwickelt, die zweiachsig der Sonne nachgeführt wird. Die Entwicklung dieser Systemtechnik und die Installation der Anlagen wurde von einem interdisziplinären Team um den Betreiber R.E.M. durchgeführt. Da es keine wissenschaftliche Begleitforschung gab, können die Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion nicht beurteilt werden. Auch sind die bisher realisierten Anlagen in der derzeitigen Ausgestaltung nicht wirtschaftlich rentabel, die da die Kosten der Systemtechnik die zu erwartenden elektrischen und landwirtschaftlichen Umsätze weit übersteigen. Diese führt einerseits zu einer reduzierten Einstrahlung auf die landwirtschaftlich genutzte Fläche und andererseits aber auch zu erhöhten Instandhaltungskosten (Quelle: agrophotovoltaik.de)



Abbildung 7: APV-Anlage von rem tec, Italien

Quelle: remtec.energy.com

1.5.3 USA

In den USA gibt es einige Forschungsprojekte und Praxisanwendungen im Bereich Agrophotovoltaik. In einem landwirtschaftlichen Demonstrationsbetrieb in South Deerfield, der zur University of Massachusetts Amherst gehört, wurde 2010 eine Pilotanlage aufgebaut (106 Panels, 25 kwp). In einer Studie wurden im Zeitraum von drei Jahren (2016-2018) unter der Anlage Gemüse produziert (siehe Abbildung), dazu gehörten Salat, Bohnen, Brokkoli, Paprika, Grünkohl und Mangold. Im Vergleich zur nicht beschatten Kontrolle fielen die Erträge im heißen Sommer 2016 unter der Anlage höher aus, in den beiden anderen Jahren dagegen bei fast allen Kulturen geringer (Herbert, Stephen, 2017).

Seit November 2018 gibt es in Massachusetts das Solar Renewable Target Programm (SMART), das u.a. den Bau und den Betrieb von AVP-Anlagen (dual-use) fördert und eine Einspeisevergütung pro kwh vorsieht. Auflagen sind: maximaler Beschattungsgrad 50%, Höhe mindestens 8 Fuß, bei Tracking-Systemen 10 Fuß, elektrische Leistung unter 2 MW. Eine weitere Auflage ist, dass das Land unter den

Anlagen über die 20jährige Laufzeit des Programmes landwirtschaftlich genutzt werden muss (UMass Clean Energy Extension, 2019).

Abbildung 8: APV-Anlage der University of Massachusetts, USA



Quelle: University of Massachusetts

Weiter Pilotprojekte wurden in Arizona an der University of Arizona und am Forschungsstandort Biosphere 2 errichtet. Die Untersuchungen der University of Arizona zeigen, dass ein Anbau von einigen Gemüsearten wie Chiltepin-Chilis, Jalapenos und Cherrytomaten im Schatten von Photovoltaik-Modulen nicht nur möglich, sondern in Trockengebieten der USA auch zu einer besseren Ernte führen kann (Barron-Gafford, G.A. et al., 2019).

1.6.4 Andere Länder

Auch in einigen anderen Ländern gibt es APV-Anlagen bzw. Pilotprojekte so in Frankreich (Wein), Südkorea (Reis, Kohl, Kartoffeln, Ginseng, Sojabohnen und Knoblauch), Indien (Gemüse). Einen guten Überblick gibt die Studie von Weselek et al. (2019) und eine Untersuchung von Brohm zu Vietnam (Brohm, R., 2018). In der Überblicksstudie von Weselek et al. (2019) wird ausführlich das Pilotprojekt des Fraunhofer Instituts in Heggelbach, Deutschland beschrieben, auf das an dieser Stelle nicht ausführlicher eingegangen werden soll.

Abbildung 9: APV-Anlage über Wein, Rians, Frankreich



Quelle: Ombrea in pv-magazine, 2019

2 Grundlagen Pflanzenbau

2.1 Wachstumsmodell Pflanze

In der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion gibt es Faktoren, auf die der Landwirt Einfluss nehmen kann, auf andere in nur sehr geringen Maße. Durch die Auswahl der Kultur, spezifischer Sorten und angepasster Kulturmaßnahmen (Bodenbearbeitung, Düngung, Pflanzenschutz, Bewässerung, Fruchtfolge etc.) kann er auf die Höhe des Ertrages bzw. auf die Qualität der Ernteprodukte Einfluss nehmen. Auf biotische Faktoren wie Pflanzenkrankheiten (Bakterien, Pilze, Viren) oder tierische Schädlinge kann er durch Kulturmaßnahmen reagieren (Pflanzenschutz, passende Fruchtfolge etc.). Abiotische Faktoren wie Temperatur, Globalstrahlung, Niederschlag, und die Bodenverhältnisse des Standortes kann er dagegen kaum beeinflussen (siehe Abbildung 10).

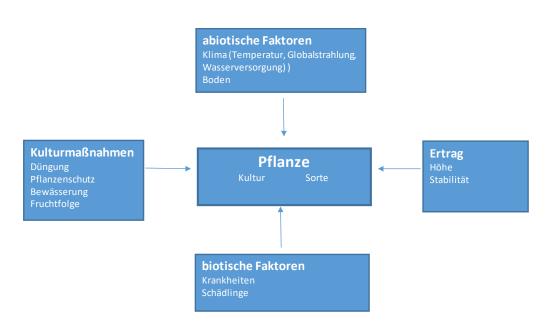


Abbildung 10: Einfluss biotischer und abiotisicher Faktoren auf Pflanzen

Quelle: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 2011

2.1.1 Einfluss abiotischer Faktoren im Freilandanbau

Im Freiland sind abiotische Einflussfaktoren auf das Pflanzenwachstum nur in geringem Umfang beeinflussbar. Die Verfügbarkeit von Wasser kann durch Bewässerungsmaßnahmen positiv beeinflusst werden, wenn es ökonomisch sinnvoll ist. Temperatur und Lichtverfügbarkeit sind nicht beeinflussbar, jedoch durch Auswahl geeigneter Kulturpflanzen bzw. geeigneter Sorten anpassbar. Durch Züchtungsarbeit kann die Kälte- bzw. Hitzetoleranz von Kulturpflanzen verbessert werden, ebenso die Trockenresistenz. Züchterische Arbeit zur Anpassung an Lichtmangel bzw. Lichtüberschuss findet bei landwirtschaftlichen Kulturpflanzen bislang kaum statt.

Da der Faktor Licht (Strahlungsenergie) im Freilandanbau kaum beeinflussbar bzw. kein begrenzender Faktor ist, gibt es nur wenige Studien, die die Reduzierung der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) auf landwirtschaftliche Kulturpflanzen untersuchen. Bei Kulturen, die in Gewächshäusern produziert werden, in denen die Verfügbarkeit von Licht durch Zusatzbelichtung bzw. Verschattung (Schattieranlagen) gesteuert werden kann, gibt es zahlreiche Untersuchungen.

Generell führt die Installation von APV zu einer Verschattung und damit zu einer Reduktion der auf den Pflanzenbestand treffenden photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR). Dadurch kann es zu einer geringeren Nettoassimilationsrate kommen und damit zu Wachstums- und Ertragsreduktionen. Es gibt Kulturpflanzen, die aufgrund ihrer ursprünglichen Herkunft (Schattenpflanzen) nur wenig Licht benötigen (z.B. Ginseng). Die europäischen Kulturpflanzen sind aber überwiegend Sonnenpflanzen und an hohe Lichtintensitäten angepasst.

Allgemein werden Schatten- und Sonnenpflanzen unterscheiden, wobei Schattenpflanzen einen niedrigeren Lichtkompensationspunkt als Sonnenpflanzen haben, d.h. sie können bei niedrigeren Lichtintensitäten effektiver Photosynthese betreiben als Sonnenpflanzen. Ihre maximale Photosyntheserate bleibt jedoch auch bei erhöhten Lichtintensitäten niedriger.

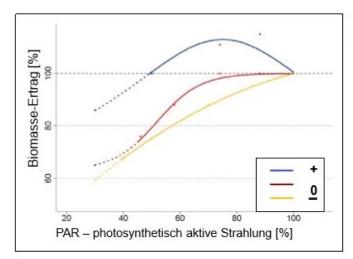
Durch die Installation von APV-Anlagen über einen Kulturpflanzenbestand wird nicht nur die Verfügbarkeit von Strahlungsenergie beeinflusst, sondern auch die Verfügbarkeit und Verteilung von Wasser (Niederschläge, Transpiration) und die Temperaturen. Das Mikroklima im Pflanzenbestand verändert sich. Um darauf zu reagieren sind Änderungen bei den Kulturmaßnahmen notwendig, (Änderungen der Fruchtfolge, Ausbringung von Düngern, Pflanzenschutz zu andern Terminen).

2.1.3 Wachstumsfaktor Licht

"Entscheidend für die Produktionsleistung des Pflanzenbestandes ist die Fähigkeit der Pflanzen, die Energie der elektromagnetischen Strahlung in organische Verbindungen zu überführen, die für die anschließenden Stoffwechselvorgänge genutzt werden." (Diepenbrock et al., 2016)

Pflanzen nutzen die Strahlungsenergie des Lichtes zur Photosynthese und damit zur Assimilation. Pflanzen nutzen einen Teil der Globalstrahlung, die an der Erdoberfläche auf eine horizontale Empfangsfläche auftreffende Solarstrahlung, welche sich zusammensetzt aus der Direkt- und der Diffusstrahlung. Sie unterliegt erheblichen Schwankungen in Abhängigkeit von der geografischen Breite, Jahreszeit, Bewölkung, Höhenlage und der Hangneigung- und richtung. In Deutschland lag die Globalstrahlung im Zeitraum von 1981 bis 2010 zwischen 900 und 1200 kWh pro m2 und Jahr auf eine horizontale Fläche. In den vergangenen Jahren wurden höhere Werte erreicht, so lag die Globalstrahlung 2018 in Niedersachsen zwischen 1100 und 1200 kWh/m2.

Abbildung 11: Einfluss der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) auf den Biomasse- Ertrag von Kulturpflanzen



Kategorie	Referenzart					
+	Salate, grünes Gemüse					
0	Raps & Gerste					
-	Mais					

Quelle: Fraunhofer ISE

Der von Pflanzen genutzten Teil der Globalstrahlung wird als photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) bezeichnet und umfasst die Wellenbereiche zwischen 400 und 500 nm (blau) und 600 bis 700 nm (hellrot). Licht trifft in Form von Photonen auf das Blatt und wird absorbiert, Das Maß für die Lichtintensität ist die Photonenstromdichte, die in μ mol m⁻² s⁻¹ gemessen wird und die Photonenfluenz als Maß für Photonenmenge (mol m-2).

Die Referenzengröße für die Photonenstromdichte an einem klaren wolkenlosen Sommertag in der Mittagszeit liegt bei 2000 μ mol m⁻² s⁻¹, an einem bewölkten Sommertag bei 400 μ mol m⁻² s⁻¹. (Einstrahlungsmaximum an hellen Sommertagen 1800 und 4500 μ mol m⁻² s⁻¹ in Abhängigkeit von der geografischen Lage).

Kulturpflanzenbestände haben eine geringe Effizienz der Lichtnutzung, die auf die Blätter eines Pflanzenbestandes auftreffende Gesamtstrahlung wird in der Photosynthese nur zu 2% ausgenutzt. Der größte Teil geht verloren durch Transpiration und Evaporation, Reflexion und Transmission und anderen Einflussfaktoren.

Der Lichtsättigungspunkt gibt den Punkt an, ab dem die Photosyntheseleistung einer Pflanze durch Erhöhung der Lichtintensität nicht mehr gesteigert werden kann, das heißt die Sauerstoffproduktionsrate konstant bleibt. In diesem Punkt unterscheiden sich C₃- und C₄-Pflanzen deutlich. Bei C₃-Pflanzen entstehen nach der Eingliederung des CO₂ im Verlauf der Photosynthese als erste stabile Zwischenprodukte zwei Triosen (Kohlenhydrate mit 3 C-Atomen). Zu den C₃-Pflanzen zählen alle Wasserpflanzen und die meisten Landpflanzen. Bei C₄-Pflanzen entstehen als erste stabile Zwischenprodukte C₄-Körper (Malat, Aspartat). Zu den C₄-Pflanzen gehören Mais und Zuckerrohr. Bisher sind über 1.000 Arten bekannt.

Bei C₃-Pflanzen liegt der Lichtsättigungspunkt im Bereich zwischen 1.300 und 1.600 μmol m⁻² s⁻¹ photosynthetischer Strahlung, bei C₄-Pflanzen liegt er deutlich höher bei über 1.600 μmol m⁻² s⁻¹ und wird häufig nicht erreicht (Diepenbrock et al., 2016). Bei hoher Einstrahlung verbunden mit hohen Temperaturen sind C₄-Pflanzen den C₃-Pflanzen in der Netto-Photosyntheserate deutlich überlegen. Sie reagieren auf ansteigende Lichtintensitäten mit weiter steigenden Photosyntheseraten. Sie sind überwiegend an Regionen mit hoher Einstrahlung und vergleichsweise ungünstiger Wasser- und Stickstoffversorgung angepasst. Zu den in den gemäßigten Klimaten am häufigsten angebauten C₄-Pfalnzen zählt der Mais, der ursprünglich aus Südamerika stammt (siehe Kapitel 3.4.2).

Tabelle 1: Unterschiede in der ökophysiologischen Anpassung von C₃- und C₄-Pflanzen

Parameter	C ₃ - Pflanze	C ₄₋ Pflanze				
Wachstumsbedingungen am natürlichen	Gemäßigtes Klima; z.B.	Trockenes Klima, hohe				
Standort	15-20°C, 60%	Lichtintensitäten, geringe				
	Luftfeuchte, hoher N-	Luftfeuchte, niedriger N-				
	Vorrat	Vorrat				
Photosynthese begrenzender Faktor	CO ₂	Licht				
Maximale Photosyntheserate	20 bis 40 μmol (CO ₂) m-	30 bis 60 μmol (CO ₂) m-2s-				
	2s-1	1				
Wert der PAR photonenflussdichte der	1.300 bis 1.600 μmol m ⁻	Über 1.600 µmol m ⁻² s ⁻¹				
photosynthetisch aktiven Strahlung, bei der	2 S ⁻¹	Häufig wird Lichtsättigung				
die maximale Netto-Photosyntheserate		nicht erreicht.				
(Lichtsättigung) erreicht wird						
Temperaturoptimum der Netto-	10 bis 30°C vorrangig	30 bis 40 °C				
photosntheserate	zwischen 15 und 25°C					
Transpirationskoeffizient(Wasserverbrauch	500 bis 700 l kg-1	200 bis 400 l kg-1				
pro Einheit gebildeter Trockenmasse)						

Quelle: nach Diepenbrock et al. (2016)

2.1.3 Einfluss von Stress durch Umweltfaktoren

Stress wird auf Pflanzen durch Umweltfaktoren ausgeübt (abiotische und biotische Faktoren). Nimmt eine Pflanze Stress wahr, kann sie auf ihn reagieren, in dem sie unterschiedliche Strategien anwendet. In der Strategie des Ausweichens ("escape") werden empfindliche Organe in Zeiten intensiven Stresses gar nicht erst ausgebildet oder durch ihre Lage vor Stress geschützt (in Dürre- oder Frostperioden in Überstehen in Form von Samen oder Früchten oder in geophytischer Lebensform wie Wurzel, Rhizom. Knolle etc.). Die zweite Strategie ist die Resistenz ("resistance"), durch die die Einwirkung von Stress abgemildert wird. Sie kann erreicht werden durch Vermeidung ("avoidance") z.B. ein zu starker Wasserverlust infolge von Trockenheit durch bestimmte physiologische oder morphologische Reaktionen. Toleranz ("tolerance") führt zum Ertragen des Stresse z.B. durch Umstellung des Stoffwechsels oder der Ausbildung widerstandsfähigerer Organe. (Thomas, 2010).

2.1.4 Lichtmangel/-überschuss als Stressfaktor

Lichtstress kann als Lichtmangel oder Lichtüberschuss auftreten. Lichtmangel tritt auf, wenn durch Konkurrenz anderer Pflanzen (in Wäldern, durch Konkurrenz von Ackerunkräuter) den Pflanzen zu wenig Licht zu Verfügung steht, aber auch durch künstliche Verschattungen verursacht durch APV-Anlagen.

Anpassungsstrategien an Lichtmangel können sein:

- Schattenvermeidungs-Reaktion: Die Wahrnehmung eines erniedrigten Hellrot zu Dunkelrot-Verhältnisses, d.h. die Pflanze registriert eine sich verschlechternde Lichtsituation. Sie führt zu erhöhtem Längenwachstum der Pflanze, beschleunigtem Sprosswachstum und Aufwärtsbewegung der Blätter, vorzeitigem Übergang in die generative Phase, zur Verringerung des Wurzelwachstums und zur Verstärkung der Apikaldominanz (Verringerung der Verzweigung) (Weiler und Nover, 2008)
- Morphologisch-anatomische Anpassungen: Es kommt zur Ausbildung von Schattenblättern mit einer großen spezifischen Blattfläche, jedoch mit einer geringeren Mächtigkeit des

Blattgewebes (einschichtiges Palisadenparenchyms), wodurch Schattenblätter oft größer, dafür aber deutlich dünner sind als Sonnenblätter. In Bezug auf die Blattmasse ist die Anzahl der Chloroplasten und die Chlorophyllkonzentration oft höher als bei Sonnenblättern, in Bezug auf die Blattfläche ist es jedoch umgekehrt (Thomas, 2010).

Lichtüberschuss tritt auf, wenn ein Blatt mehr Strahlungsenergie absorbieren als zur Photosynthese verwendet wird. Dadurch kommt es kommt zur Photoinhibition, bei stärkeren oder längerem Lichtüberschuss zur Photodestruktion, was bedeutet, dass die Photosynthesepigmente reversibel oder irreversibel (bei Photodestruktion) geschädigt bzw. zerstört werden.

Anpassungsstrategien an Lichtüberschuss könne sein:

- Veränderung der Blattstellung, Änderung der Chloroplastenanordnung
- Morphologisch-anatomische Anpassungen: dichte Behaarung der Blätter (Reflexion), Zellwandverdickungen in der Epidermis (Absorption), Anreicherung mit Schutzpigmenten

Stress durch Strahlung kann auch durch eine erhöhte Dosis an UV-Strahlung (UV-B-Strahlung) entstehen. Dies kann zu Schäden an der DNA, an Biomembranen und Proteinmolekülen sowie an Photosynthesepigmenten führen, was zu massiven Stoffwechsel- und Wachstumsbeeinträchtigungen der Pflanzen führt (Thomas, 2010)

Die erhöhte Variabilität der Einzelpflanzen ausgelöst durch Umweltfaktoren wie Lichtmangel, Nährstoffmangel etc. ist in der landwirtschaftlichen Produktion unerwünscht. Angestrebt wird ein gleichmäßig entwickelter Pflanzenbestand, um den optimalen Erntezeitpunkt zu erreichen. Eine verzögerte Einwicklung der Pflanzen in Teilen des Schlages (Feldes) erschwert dies und führt zu Ertragsund Qualitätseinbußen.

2.2 Studienlage und Literatur zu Auswirkungen von Lichtmangel

In wie weit mitteleuropäische Kulturpflanzen mit reduzierten Lichtangebot noch zufriedenstellende Erträge bzw. Qualitäten erbringen, wenn sie eine Verschattung durch APV-Anlangen erfahren, wurden bislang wenig untersucht. Weselek et al. (2019) haben in einem Review die Studienlage dargestellt, auf die hier u.a. zurückgegriffen wird. Weiterhin gibt es einige Studien zu Agroforstsystemen, in denen die Verschattungen durch die gleichzeitige Kultur von Bäumen erzeugt wird. Reynolds et.al (2007) stellen fest: "PAR was highly correlated with net assimilation and growth and yield of both agricultural crops" In einigen Studien wird die Verschattung durch den Einsatz von Schattierungsnetzen erzeugt (Schulz et al., 2016).

In gewissen Rahmen sind diese Ergebnisse übertragbar auf Verschattungen durch APV-Anlagen. Weitere Forschungen in diesem Gebiet sind jedoch erforderlich, um Kulturpflanzen an ihren jeweiligen Standorten auf ihre Reaktion auf Licht bzw. dessen eingeschränkte Verfügbarkeit zu untersuchen. Weitreichenden Untersuchungen sind notwendig, um spezifische Sortenunterschiede festzustellen.

In diesem Gutachten werden die Hauptkulturen im niedersächsischen Ackerbau und einige Sonderkulturen auf ihr Eignung im Hinblick auf den Anbau unter APV-Anlagen untersucht.

Eine erste Einschätzung mit den Ergebnissen des Pilotprojektes in Heggelbach hat das Fraunhofer Institut publiziert. Es teilt landwirtschaftliche Kulturen ein in:

 Kategorie Minus: Pflanzen mit hohem Lichtbedarf, z.B. Mais, die schon bei geringer Beschattung mit Ertragsreduktion reagieren und für den Anbau unterhalb einer APV-Anlage deshalb weniger geeignet sind.

- Kategorie **Null**: Kulturarten, wie bspw. Raps, wo sich eine mäßige Beschattung kaum auf die Erträge auswirkt.
- Kategorie **Plus**: Kulturen, für die eine Beschattung positive Auswirkungen auf die quantitativen Erträge hat (z.B. Kartoffel) (Trommsdorff, 2018)

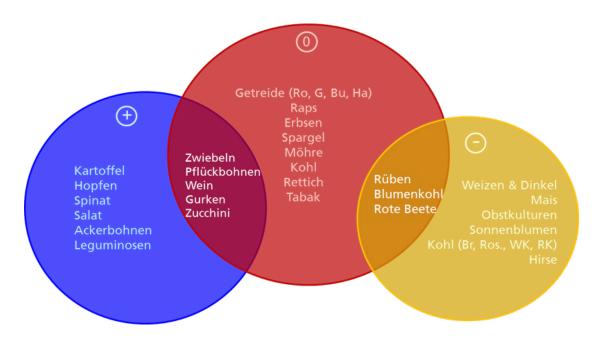


Abbildung 12: Eignung von Kulturpflanzen für den Anbau unter APV-Anlagen

Quelle: Trommsdorf, 2018 (Fraunhofer ISE)

3. Landwirtschaftliche Anbausysteme

3.1. Fruchtfolge

Essentiell in einem landwirtschaftlichen Anbausystem ist die Fruchtfolge, d.h. der geordnete, sinnvolle zeitliche Wechsel der Pflanzenbestände auf dem Ackerland. Sie dient dazu, negative Auswirkungen des Anbaues von Reinbeständen auszugleichen und die Vegetationszeit optimal auszunutzen. Dadurch wird eine effektive Nutzung des Bodens erreicht mit einer hohen Biomasseproduktion unter Minimierung der Brachezeit. Dafür ist es wichtig, die optimalen Saat- und Erntetermine für Haupt,-Zweit und Zwischenfrucht einzuhalten. In einer Fruchtfolge werden die Wirkungen von Vorfrucht- und Fruchtfolgewirkungen genutzt, sie verhindern die Vermehrung von bodenbürtigen Schaderregern, senkt den Unkrautdruck und erhält und verbessert die Bodenfruchtbarkeit. Indem fruchtartspezifische Anbaupausen eingehalten werden, werden fruchtfolgeabhängiger Wachstums- und Ertragsbeeinträchtigungen abgewendet (Diepenbrock et al. (2016).

Unterschieden werden:

- **Blattfrüchte:** alle Nichtgetreidearten einschließlich Silo-Grünmais und Ackergras, Raps, Kartoffel, Ackerbohne, Erbsen etc.
- Halmfrüchte: Alle Getreidearten und Körnermais, auch Getreide-Hülsenfruchtgemenge

Eine andere Einteilung erfolgt nach Vegetationslänge: die **Hauptfrucht** ist die Kultur, die über die gesamte oder den überwiegenden Teil der Vegetationsperiode auf dem Feld steht, die **Zwischenfrucht** steht zwischen zwei Hauptfrüchten, um Anbaulücken zu schließen.

Im zeitlichen Ablauf der Fruchtfolge wird die einer Fruchtart auf derselben Fläche vorangestellte Hauptfrucht als **Vorfrucht** bezeichnet, die der Vorfrucht nachfolgenden Hauptfrucht als **Nachfrucht** (siehe Abbildung 13). Ackerkulturen stellen unterschiedliche Ansprüche an ihre Vorfrucht, den Vorfruchtanspruch, der auf agritechnischen Terminen, den Bodenzustand, dem Wasserbedarf und die phytosanitären Faktoren beruht. Zwischen den Hauptfrüchten ergeben sich so ertrags- und qualitätswirksame Effekte, die Vorfruchtwirkung. Sie umfasst den gesamten Einfluss des Anbaues einer bestimmten Fruchtart auf die Nachfrucht und die Bodenfruchtbarkeit. Dieser Gratiseffekt der Natur kann in einer optimal eingerichteten Fruchtfolge die Ertrags- und Qualitätsbildung maßgeblich beeinflussen. (Diepenbrock et al. 2016).

Abbildung 13: Geeignete Vor- und Nachfrüchte in landwirtschaftlichen Kulturen

		Vorfrucht															
		Winterweizen	Sommerweizen	Wintergerste	Sommergerste	Winterroggen	Triticale	Hafer	Silomais	CCM-/Körnermais	Ackerbohnen	Erbsen	Spätkartoffeln	Frühkartoffeln	Winterraps	Zuckerrüben	Runkelrüben
	Winterweizen	_	_	_	_	0	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Sommerweizen	_	_	_	_	0	0	+	+	+	*	*	*	*	*	+	*
	Wintergerste	+	+	_	_	+	+	+	0	_	3/10	nje	_	+	*	_	-
	Sommergerste	+	+	_	_	+	+	+	*	*	*	*	*	*	*	+	*
	Winterroggen	+	+	+	+	0	0	+	+	0	*	*	_	*	*	_	*
등	Triticale	0	0	+	+	+	0/-	+	+	0	*	*	_	*	*	_	*
Nachfrucht	Hafer	+	+	+	+	+	+	_	*	*	*	*	*	*	*	*	*
당	Mais	+	+	+	+	+	+	+	0	0	*	*	+	*	*	+	+
ž	Ackerbohnen	+	+	*	+	+	+	+	+	+	_	_	*	*	*	*	*
	Erbsen	+	+	*	+	+	+	+	+	+	_	_	*	*	*	*	*
	Spät-/Frühkartoffeln	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	_	_	*	+	+
	Winterraps	0	0	+	+	0	0	0	_	_	_	+	_	+	_	_	_
	Zuckerrüben	+	+	+	+	+	+	*	_	_	_	+	*	*	_	_	_
<u> </u>	Runkelrüben	+	+	+	+	+	+	+	0	+	+	+	*	*	_	_	_

- + günstige Vorfrucht
- * günstige Vorfrucht, aber Luxusfolge, weil andere Nachfrüchte die Vorfruchtwirkung besser ausnutzen können, längere vegetationsfreie Zeit ggf. durch Zwischenfrüchte nutzbar
- mit Einschränkungen möglich
- ungünstige Vorfrucht (Ertragsabfall, Fruchtfolgekrankheiten) bzw. Einhaltung der Bestelltermine der Nachfrucht nicht möglich

Quelle: Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2015

Eine typische Fruchtfolge im westlichen Niedersachsen wäre: Frühkartoffeln-Winterweizen-Wintergerste-Mais-Sommerweizen (Blattfrucht-Halmfrucht-Halmfrucht-Blattfrucht- Halmfrucht).

Die Selbstverträglichkeit ist eine Eigenschaft von Fruchtarten, die auf einen mehrmaligen Anbau auf gleicher Fläche nicht oder kaum mit Ertrags- und Qualitätseinbußen reagiert (z.B. Mais). So ist der Anbau in mehrjähriger Selbstfolge möglich (Monokultur). Es steigt jedoch der Druck durch bodenbürtige Schaderreger (Pilze, tierische Schaderreger) und auch der Druck durch spezifische Unkräuter, was zu Ertragseinbußen führt.

Ökologische und sozioökonomische Gründe für die Wahl des Bodennutzungssystems sind die natürliche Standortbedingungen: Dazu zählen Bodengüte, klimatische Verhältnisse, Höhenlage, Geländegestalt, die Betriebsform (Acker-oder Veredelungsbetrieb), die Preise für Produktionsmittel, die Marktpreise und die Kundenstruktur, sowie arbeitstechnischen Rahmenbedingungen. Zudem sollte der Boden möglich durchgehend genutzt werden (geringe Brachezeiten). Gesetzliche Auflagen im Hinblick auf die Fruchtfolge sind ebenfalls zu beachten. Das sogenannte "Greening" verpflichtet die Betriebe zur Anbaudiversifizierung und zur Ausweisung ökologischer Vorrangflächen. Nur wenn diese Bedingungen eingehalten werden, erhält der Betrieb neben der Basisprämie auch die Greeningprämie als staatliche Leistung. Zu den ökologischen Vorrangflächen zählen zum Beispiel die Bestellung mit Zwischenfrüchten (Samenmischung) oder Untersaaten mit Gras oder Leguminosen oder nur Leguminosen (Sojabohne, Lupine, Luzerne, Linsen-Acker- und Gartenbohne sowie Erbsen). (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2020).

Eine den Standortbedingungen angepasste Fruchtfolge ist essentiell für den wirtschaftlichen Erfolg eines Betriebes. Die Standzeiten ackerbaulicher Kulturen betragen zwischen 4 und 12 Monaten. Das bedeutet, dass auf Feldern mit installierten APV-Systemen die Kulturen im ständigen Wechsel angebaut werden. Daher muss das APV-System an mehrere Kulturen angepasst sein.

Dauerkulturen stehen dagegen mehrere Jahre auf derselben Fläche. Dazu zählen Obstkulturen (Baumund Beerenobst) mit einer Kulturdauer zwischen 5 und 20 Jahren, und bei den Gemüsekulturen der Spargel (5 bis 8 Jahre). Baumschulkulturen und Weihnachtsbaumkulturen zählen ebenfalls dazu. Hier muss nach Ablauf des Anbaues oft eine sehr lange Zeit eingehalten werden, damit dieselbe Fläche wieder mit der gleichen Kultur bestellt werden kann (Bodenmüdigkeit).

Wichtige Aspekte der Fruchtfolge

- Verfügbarkeit geeigneter Flächen (Bodenart, Möglichkeit zur Zusatzbewässerung, Betriebsnähe)
- Abfolge der Kulturen mit kurzen Brachezeiten
- Phytosanitäre Gesichtspunkte: Vermeidung von Fruchtfolgekrankheiten, Schädlinge, Unkrautdruck
- Menge und Qualität an Enterrückständen
- N- und Humusbilanz
- Nutzung verlagerter N-Mengen durch tiefwurzelnde Arten
- Wirtschaftsdüngereinsatz
- Bodengare bzw. Strukturschäden nach Einsatz von Erntemaschinen
- Erosionsschutz durch schnelle und durchgehende Bedeckung des Bodens

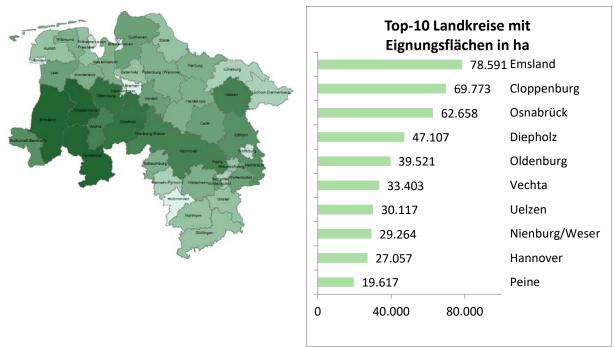
(Quelle: Laber und Lattauschke (Hrsg.), 2014)

1.7 Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE)

Ziel des Projektes INSIDE ist es, Flächen für die Nutzung für Agrophotovoltaik auszuweisen, um den Ausbau der Photovoltaik in Niedersachsen zu fördern. Nach ersten Ergebnissen des Projektes stehen hierfür in Niedersachsen mit über 563.300 ha rund 12% der Landesfläche als mensch- und naturverträgliches Flächenpotential für eine Nutzung mit Freiflächenphotovoltaik (FF-PV) zur Verfügung, was einer potentiellen Ertragsleistung von rund 570 GW entsprechen würde (1,0108 MW je ha) (Badelt, 2019).

Abbildung 15: Geeignete Landkreise für den Ausbau von FF-PV-Anlagen

Abbildung 14: Eignungsflächen für FF-PV-Anlagen, Top-10 Landkreise in Niedersachsen



Quelle: Badelt, 2019

In der Untersuchung wurde die räumliche Verteilung der für Freiflächen-PV geeigneten Flächen grafisch dargestellt. Die größten Potentiale liegen der Studie zu Folge in den Landkreisen Emsland, Cloppenburg und Osnabrück. Diese Landkreise sind sehr stark landwirtschaftlich geprägt, so liegt in diesen Landkreisen zusammen 14,5 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Niedersachsen.

In diesen Landkreisen ist der Anteil an Veredelungsbetrieben, d.h. Betriebe mit Tierhaltung (Schweine, Hühner) hoch, was hohe Viehdichten zur Folge hat. Die Entsorgung der in dieser Produktion anfallenden Menge an organischen Substanzen in Form von Gülle, Jauche, Stallmist oder auch Gärresten aus Biogasanlagen erfolgt als Wirtschaftsdünger auf landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Ein Teil der landwirtschaftlichen Flächen in diesen Landkreisen fallen in die "Roten Gebiete" (siehe Abbildung 16). In Niedersachsen zählen 39% der landwirtschaftlich genutzten Fläche (ca. 1 Mio. ha). zu den "Roten Gebieten" der Gebietskulisse Grundwasser-Nitrat-Kulisse und 35.000 ha zur Gebietskulisse Oberflächengewässer Phosphatkulisse. Für die Landwirtschaft in diesen Gebieten gelten besondere Vorschriften in Bezug auf die Ausbringung von Düngemitteln, insbesondere auf die von Wirtschaftsdüngern. In Folge der neuen Düngemittelverordnung, die im Laufe des Jahres 2020 beschlossen werden wird, sind weitere Einschränkungen in diesen Gebieten wahrscheinlich, was unter Umständen auch negativen Einfluss auf das Ertragsniveau der hier angebauten landwirtschaftlichen

Kulturen haben könnte. So soll in diesen Regionen der Düngerbedarf um 20% im Durchschnitt der Flächen eines Betriebes verringert werden müssen (topagrar online, 2020).



Abbildung 16: Gebietskulisse Grundwasser- Nitratkulisse und Oberflächenwasser, Phosphatkulisse "Rote Gebiete"

Quelle: LEA-Portal Landesentwicklung und Agrarförderung Niedersachsen

Aufgrund des hohen Flächenbedarfs der Veredelungsbetriebe zur Entsorgung der Wirtschaftsdünger ist die Flächennachfrage in diesen Gebieten hoch, was hohe Kauf- und Pachtpreise zur Folge hat. Auf die Entwicklung der Pachtpreise wird in Teil 2 des Gutachtens ausführlicher eingegangen.

1.8 Landwirtschaftsstruktur in Niedersachsen

Niedersachsen umfasst eine Fläche 47.616 km², davon werden 62% der Fläche landwirtschaftlich genutzt (siehe Abbildung 17). 23% der Fläche entfallen auf Wald und 13% auf Siedlungs- und Verkehrsflächen (Landesamt für Statistik Niedersachsen, 2018). Nach Angaben aus der Agrarstrukturerhebung 2016 (Landesamt für Statistik Niedersachsen (2019) (a)) wurden 2016 etwas weniger als dreiviertel der landwirtschaftlichen Fläche als Ackerland und etwas mehr als ein Viertel als Grünland genutzt.

andere Nutzung 1% Ackerland 39% Waldfläche Landwirtschaftlich 23% genutzte Fläche 62% Grünland 21% Verkehrsfläche 5% Erholungsfläche 1% Gartenland, Moor, Heide, Brachland, Gebäude-und 2% Freifläche 8%

Abbildung 17: Landnutzung in Niedersachsen

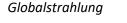
Quelle: Landesamt für Statistik Niedersachsen, 2018

Niedersachsen ist in 37 Landkreise (einschließlich der Region Hannover) und 8 kreisfreie Städte gegliedert. Es liegt in der gemäßigten Klimazone Mitteleuropas und befindet sich im Übergangsbereich zwischen maritimen Klima in Westeuropa und dem kontinentalen Klima in Osteuropa. Der Nordwesten ist geprägt durch atlantisches bis subatlantisches Klima mit einer vergleichsweise geringen Temperaturamplitude im Jahresverlauf. Der Südosten Niedersachsens wird zunehmend durch das Kontinentalklima mit stärkeren Temperaturunterschieden zwischen Sommer- und Winterhalbjahr und geringeren und jahreszeitlich ungleich verteilten Niederschlägen geprägt.

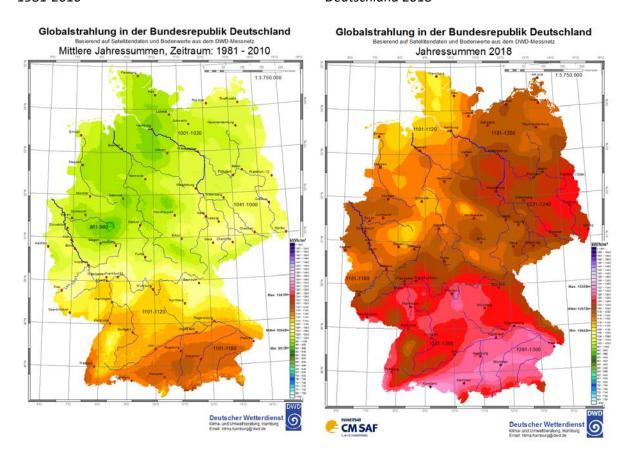
Die mittleren Jahressummen der Globalstrahlung in Niedersachsen lagen im Zeitraum 1981 bis 2010 zwischen 950 und 1040 kWh pro m^2 (Deutscher Wetterdienst, 2019). In den Jahren 2018 und 2019 wurden deutlich höhere Werte erreicht (über 1200 kWh $/m^2$) (siehe Abbildung 18 und 19). Die Globalstrahlung liegt im Durchschnitt rund 10% niedriger als im Süden Deutschlands. So wurden 2018 in Bayern Werte von über 1300 kWh $/m^2$ erreicht.

Abbildung 18: Globalstrahlung in Deutschland 1981-2010

Abbildung 19: Deutschland 2018





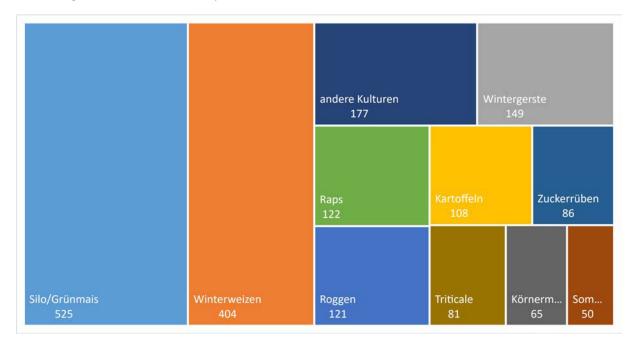


Quelle: Deutscher Wetterdienst (DWD), 2019

3.3. Landwirtschaftliche Kulturen in Niedersachsen

Niedersachsen verfügt über 2,6 Mio. ha landwirtschaftlicher Nutzfläche, davon werden etwa 2/3 als Ackerland (2016: 1,887 Mio. ha) und etwas weniger als 1/3 (2016: 0,696 Mio. ha) als Dauergrünland genutzt. Die fünf wichtigsten landwirtschaftlichen Hauptkulturen in Niedersachsen waren laut Agrarstrukturerhebung 2016 (Landesamt für Statistik Niedersachsen (2019) (a)) Silo/Grünmais, Winterweizen, Wintergerste, Kartoffeln und Roggen. Silo/Grünmais war mit 525.000 ha die mit weitem Abstand flächenmäßig am häufigsten angebaute Kultur, Winterweizen folgte mit 404.000 ha, Wintergerste mit 149.000 ha und Kartoffeln mit 108.000 ha (siehe Abbildung 20).

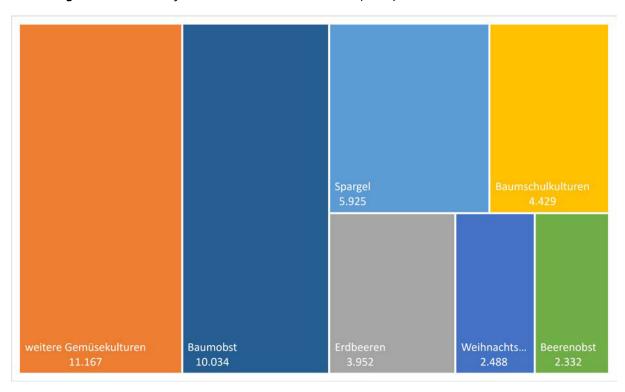
Abbildung 20: Ackerbauliche Hauptkulturen in Niedersachsen (in 1.000 ha)



Quelle: Landesamt für Statistik Niedersachsen, 2019 (a), Agrarstrukturerhebung 2016

Sonderkulturen wie Gemüse und Erdbeeren wurden 2016 auf 21.044 ha im Freiland angebaut, davon auf 3.952 ha Erdbeeren und auf 5.926 ha Spargel. Dauerkulturen wurden 2016 auf insgesamt 19.346 ha produziert, davon auf 12.383 ha Baum – und Beerenobst. Auf Beerenobst entfielen dabei 2.332 ha, allein auf Heidelbeeren 1.814 ha als wichtigste Kultur. Auf 4.429 ha wurden Baumschulkulturen und auf 2.488 ha Weihnachtsbaumkulturen produziert (siehe Abbildung 21).

Abbildung 21: Sonderkulturflächen in Niedersachsen 2016 (in ha)



Quelle: Landesamt für Statistik Niedersachsen, 2019(a), Agrarstrukturerhebung 2016, Anbauerhebung Spargel und Erdbeeren, 2016

3.3.2 Verteilung nach Landkreisen

Im Nordwesten Niedersachsens dominiert der Maisanbau die ackerbauliche Nutzung der Flächen. In den Kreisen Emsland, Cloppenburg, Oldenburg und Vechta wird Grün/Silomais und Körnermais auf bis zu 50% der landwirtschaftlichen Flächen produziert. Im östlichen Niedersachsen dominiert der Anbau von Winterweizen und von Zuckerrüben. In der folgenden Abbildung 22 werden die Hauptkulturen für Top-10 Landkreise mit Eignungsflächen für APV-Anlagen in Niedersachsen dargestellt.

100 90 80 10 70 8 10 20 14 9 60 11 15 7 8 11 12 50 7 12 15 12 40 15 10 18 19 9 2 30 33 36 21 20 41 40 36 30 30 27 0 23 1 10 O 11 12 10 0 Diepholi Hannover ■ Winterweizen Nichtung Inteset

Triticale
Felder **Vechta** Peine

Wintergerste

■ Gemüse und Erdbeeren

Kartoffeln

Abbildung 22: Anteile landwirtschaftlicher Kulturen an der Ackerfläche nach Landkreisen (in % an der gesamten landwirtschaftlichen Nutzfläche)

Quelle: Landesamt für Statistik Niedersachsen (a), Agrarstrukturerhebung 2016

■ Körnermais

■ Winterraps

Roggen

Die landwirtschaftliche Nutzfläche im Emsland umfasst 162.500 ha, wovon 90% ackerbaulich genutzt werden. Damit verfügt das Emsland über die größten Ackerflächen in Niedersachsen. Auf fast 50% der Ackerfläche (71.000 ha) wurden 2016 Silo-/Grünmais und Körnermais produziert. Eine weitere wichtige Kultur ist die Kartoffeln (15% der Fläche, 22.100 ha). Weitere hohe Flächenanteile für die Maisproduktion weisen die Landkreise Cloppenburg (53%) und Oldenburg (45%) auf. In diesen Landkreisen ist die Viehdichte, wie in Kapitel 1.7 erwähnt, hoch, da hier die Veredelungswirtschaft einen Schwerpunkt in der Betriebsausrichtung hat. Im Durchschnitt wies Niedersachsen 2010 eine Viehdichte von 1,2 Großvieheinheiten (GVE) pro ha auf. Der Landkreis Vechta erreichte 2010 3,6 GVE/ha, der Landkreis Cloppenburg 3,1GVE/ha, der Landkreis Grafschaft Bentheim 2,6 GVE/ha und der Landkreis Emsland 2,3 GVE/ha (Landesbetrieb für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen (2011): Landwirtschaftszählung 2010). Dies bedeutet, dass in diesen Landkreisen viel organischer Dünger anfällt, der als Wirtschaftsdünger ausgebracht oder in andere Regionen Export exportiert wird.

Mais

Sommergerste

■ übrige Kulturen

■ Zuckerrüben

3.4 Hauptkulturen in Niedersachsen

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Ackerbaukulturen in Niedersachsen beschrieben und ihre Eignung hinsichtlich der Produktion unter APV-Anlagen aus der Literatur abgeleitet.

3.4.1 Kartoffeln

In Deutschland wurden 2019 nach vorläufigen Angaben des Stat. Bundesamtes auf einer Fläche von 276.300 ha rund 10,42 Mio. t Kartoffeln produziert. Niedersachsen ist vor Bayern und NRW der größte Kartoffelproduzent in Deutschland. 2019 wurde in Niedersachsen nach vorläufigen Angaben auf einer Fläche von 123.500 ha rund 4,86 Mio. t produziert (Destatis, 2019).

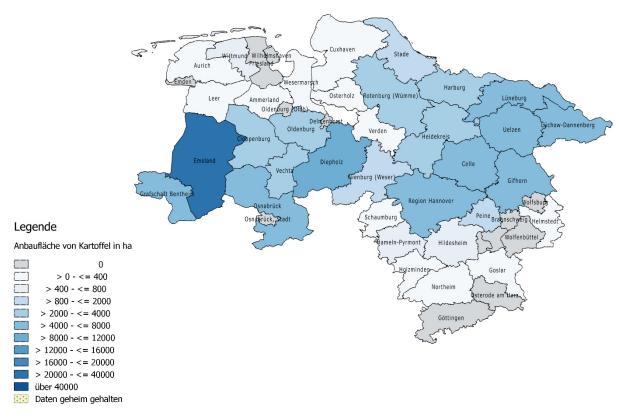
Für 2016 weist die Agrarstrukturerhebung in Niedersachsen (Landesamt für Statistik, 2019(a)) eine Kartoffelproduktionsfläche von 108.000 ha aus. Der Schwerpunkt des Anbaues liegt in den Landkreisen Emsland (22.000 ha) und Diepholz (11.000 ha), gefolgt von Gifhorn und Uelzen mit je rund 7.500 ha und der Grafschaft Bentheim mit über 6.000 ha.

Abbildung 23: Regionale Verteilung der Anbauflächen für Kartoffeln in Niedersachsen 2016

Kartoffel (Solanum tuberosum)Familie der Solanaceae (Nachschattengewächse).

Stammt aus Südamerika. In Deutschland eingeführt im 17. Jahrhundert, hat seit den 1950er Jahren ihre Bedeutung als Grundnahrungsmittel und Futtermittel verloren (von fast 2 Mio. ha Anbaufläche auf heute unter 300.000 ha).

Anbau von Industrieware (Stärkegewinnung) und zur Weiterverarbeitung (Chips, Pommes, etc.) und als Speiseware (Frischverzehr). Auch als Futtermittel finden sie Verwendung.



Quelle: eigene Darstellung, nach Daten des Landeamtes für Statistik, Agrarstrukturerhebung 2016

Kartoffeln sind in Deutschland eine landwirtschaftliche Hauptkultur und werden den Hackfrüchten zugeordnet. Sie werden in vielen Regionen angebaut, da sie relativ anspruchslos in Bezug auf die Bodenverhältnisse sind. Die meisten Böden außer schweren tonigen, steinhaltigen und verdichteten Böden sind für den Anbau geeignet. Vorteilhaft sind humose, lockerere und siebfähige Böden, die leicht erwärmbar sind. Für die Ernte ist ein auch unter schlechten Wetterbedingungen siebfähiger Boden wichtig.

Die Kartoffel hat geringe Ansprüche an die Vorfrucht. Geeignete Vorfrüchte sind Leguminosen, Raps, Zuckerrüben und Getreide. Die Kartoffel selbst hat einen hohen Vorfruchtwert, sie hinterlässt einen lockeren und unkrautfreien Boden. Nach frühreifenden Sorten können Winterraps und Wintergetreide folgen, bei späten Sorten eine Winterung (bzw. Frühjahrsbestellung mit Mais oder Sommergetreide). Eine drei- bis vierjährige Anbaupause wird empfohlen, da Kartoffeln zwar selbstverträglich sind, der Befall mit Nematoden aber steigen kann.

Die Kartoffel ist eine bewässerungswürdige Pflanze, sie reagiert besonders negativ im Zeitraum zwischen Knollenansatz und Höhepunkt der Blüte auf Schwankungen der Wasserversorgung. Die Kartoffel hat im Vergleich zu Ackerkulturen ein nur schwach ausgeprägtes Wurzelwerk und benötigt daher ausreichend Wasser in den oberen Bodenschichten. Kartoffeln werden daher oft beregnet, vor allem durch Überkopfberegnung. Die Kartoffel ist relativ temperaturempfindlich. Bei hohen Temperaturen bilden die Pflanzen deutlich weniger Knollen aus, zusätzlich spielt der Einfluss der Tageslänge eine Rolle. Ist es zu warm, bilden die Pflanzen mehr Blattmasse und wenig Knollen mit geringerem Stärkegehalt aus. Durch Züchtung versucht man, neue an höhere Temperaturen angepasste Sorten zu gewinnen.

Der Anbau von Kartoffel erfolgt üblicherweise in Dammkultur. Die Dämme werden im Herbst, auf frühzeitig abtrocknenden leichten Böden auch im Frühjahr, erstellt. Zum Einsatz kommen Dammfräsen in unterschiedlichen Breiten (meist 4 Dämme gleichzeitig). Die Aussaat erfolgt maschinell mit einer Kartoffellegemaschine (1 bis 4 reihig) im Frühjahr bei 4 bis 10°C. Die Unkrautbekämpfung erfolgt in Kombination aus mechanischen und chemischen Maßnahmen und ist besonders in der Phase bis zum Bestandsschluss wichtig (Konkurrenz). Die Pflanzenschutzmittelausbringung erfolgt bei Krankheiten (z.B. Krautfäule (Phytophthora infestans) oder Schädlingsbefall (Kartoffelkäfer). Zum Einsatz kommen Hackstriegel zur mechanischen Unkrautbekämpfung, Feldspritzen mit unterschiedlicher Gestängebreite (bis zu 36 m) zur Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln (Herbizide, Insektizide, Fungizide). Die Düngung erfolgt im Herbst und Frühjahr nach Bedarfsermittlung mit einem Düngerstreuer. Die Ernte im Herbst erfolgt mit vollautomatischen Kartoffelvollerntemaschinen, die oft selbstfahrend sind.

Eignung zum Anbau unter Agrarphotovoltaik-Anlagen

Weselek et al. (2019) haben in ihrem Review eine Übersicht über die Literatur zum Einfluss von Verschattung (shading) auf unterschiedliche Kulturen erstellt. Für Kartoffeln zitieren sie drei Veröffentlichungen aus Peru, Australien und Sri Lanka. Diese Studien ergaben, dass die Zahl der Knollen und der Ertrag durch Verschattung reduziert wird – außer in Regionen mit einer hohen Globalstrahlung. Dort stieg der Ertrag, wenn Verschattung während der frühen Wachstumsphase oder zur Mittagszeit angewendet wurde. Zu ähnlichen Ergebnisse kamen auch Welesek et al. (2019) in einem Demeterbetrieb in Baden-Württembergischen Heggelbach. Auch hier wurde eine geringere Größe der Knollen festgestellt. Der Gesamtertrag unter APV war 2017 geringer (-18%) als auf der Referenzfläche, 2018 war er um 11% höher (Hitzesommer). Der Anteil an Knollen der Größe 35-50mm Durchmesser war in den Ernten unter APV in beiden Jahren höher. Allerdings ist zu beachten, dass das Ertragsniveau im biologischen Anbau geringer ist als im konventionellen Anbau und die Ergebnisse daher nur eingeschränkt übertragbar sind.

Schulz et al. (2016) kommen in ihrem Verschattungsversuch zu dem Schluss, dass sich die Kartoffel sehr robust gegen Beschattung zeigte. Bei Wachstum und Eintritt der Entwicklungsstadien konnten keine Unterschiede zwischen den Beschattungsvarianten ermittelt werden. Jedoch traten bei mittlerer und starker Beschattung Ertragseinbußen hinsichtlich der Trockenmasse auf. Die Anzahl der ausgebildeten Knollen wurde nicht signifikant beeinflusst. Nach Wurr et al. (1997) soll erst ab einer starken Beschattung von 70% während der Phase des Knollenansatzes eine reduzierte Anzahl an Knollen zu beobachten sein.

Kartoffeln scheinen unter mäßiger Beschattung nur geringe Ertragseinbußen zu zeigen. Die Knollengröße scheint etwas kleiner zu sein, was für die Produktion für den Frischmarkt von Vorteil wäre, für die Industrieproduktion, wo hingegen große Kalibergrößen erforderlich sind, aber negativ auswirkt. Bei hoher Einstrahlung und hohen Temperauren (Hitzesommer 2018 in Deutschland und Ergebnisse in anderen Ländern) können Kartoffeln von einer Beschattung profitieren.

3.4.2 Mais

Mais ist eine der Hauptkulturen der deutschen Landwirtschaft. 2019 wurde Silomais/Grünmais deutschlandweit auf einer Fläche von 2,23 Mio. ha angebaut (Destatis 2019). Mais wird verwendet sowohl für den Anbau als Silage (Futter) als auch als Gärsubstrat in Biogasanlagen. Mais wird ebenfalls für die Körnerproduktion angebaut, jedoch in erheblich geringerem Umfang. 2019 wurde Körnermais deutschlandweit auf 427.000 ha produziert.

Niedersachsen ist das Bundesland mit der größten Anbaufläche an Silomais/Grünmais. 2019 wurde hier auf 514.200 ha Mais angepflanzt. Bayern liegt mit 434.000 ha an zweiter und Nordrhein-Westfalen mit 205.000 ha an dritter Stelle (Destatis, 2019)

In Niedersachsen liegen die Hauptanbaugebiete für Mais in den Landkreisen Emsland und Rotenburg (Wümme) (siehe Abbildung 24). Nach Ergebnissen der Agrarstrukturerhebung 2016 (Landesamt für Statistik Niedersachsen (a)) wurden im Emsland 2016 auf einer Fläche von rund 53.200 ha Silo- bzw. Grünmais und auf 17.700 ha Körnermais produziert. Im Landkreis Rotenburg (Wümme) wurden 2016 auf 49.500 ha Silo-und Grünmais und auf 2.900 ha Körnermais erzeugt. Neben dem Emsland, in dem 10% der niedersächsischen Maisproduktion stattfindet, wird auch in den weiteren Landkreisen des Regierungsbezirk Weser-Ems in Cloppenburg (34.500 ha) und Osnabrück (29.200 ha) Mais produziert. Weitere Landkreise mit großen Maisanbauflächen sind Cuxhaven (34.900 ha) und Diepholz (32.400 ha). Etwa ein Drittel wird für die Verwendung als Gärsubstrat in Biogasanlagen erzeugt. 2016 waren dies rund 228.000 ha (Kompetenzzentrum Niederachsen, 2019).

Mais kann auf fast allen Böden angebaut werden, ungeeignet sind kalte Ton- oder staunasse Böden oder frostgefährdete Lagen (Moorböden).

Mais stellt an die Fruchtfolge keine besonderen Ansprüche. Da er eine gute Selbstverträglichkeit hat, ist er gut in Körner- als auch Blattfruchtfolgen zu integrieren. Er überträgt keine Fruchtfolgekrankheiten anderer Getreidearten und ist daher ein wichtiges Glied in getreidereichen Fruchtfolgen. Auch ein mehrjähriger Anbau auf derselben Fläche ist ohne

Mais

Zea mays L.

Poaceae (Süßgräser)

Stammt aus Mittelamerika (Subtropen). Wurde schon zu Zeiten der Ureinwohner züchterisch bearbeitet, wodurch es eine Vielzahl von verschiedenen Maistypen gibt.

Mais ist eine C₄-Pflanze und erreicht hohe Erträgen an Trockenmasse pro Flächeneinheit. Die wirtschaftliche Bedeutung des Maisanbaus stieg seit den 60er Jahren stetig. Ertragreiche und klimatisch angepasste Sorten ermöglichen den Anbau auch bei weniger günstigen Anbaubedingungen hohe und sichere Erträge, auch auf Grenzstandorten. Von 1960 hat sich die Anbaufläche von knapp über 100.000 ha auf 2,3 Mio. ha gesteigert (Körner und Silo/Grünmais).

Gute Mechanisierbarkeit aller Arbeitsgänge erlaubt einenwirtschaftlichen Anbau.

Verwendung

Der Anbau von Silo/Grünmais erfolgt zur Produktion von Futtermitteln (Silage, Lieschkolbenschrot, Corn-Cob-Mix)) und als Gärsubstrat für Biogasanlagen. Körnermais wird zur zur Produktion von Futtermitteln und zur industriellen Verwertung (Öle und Stärke) angebaut.

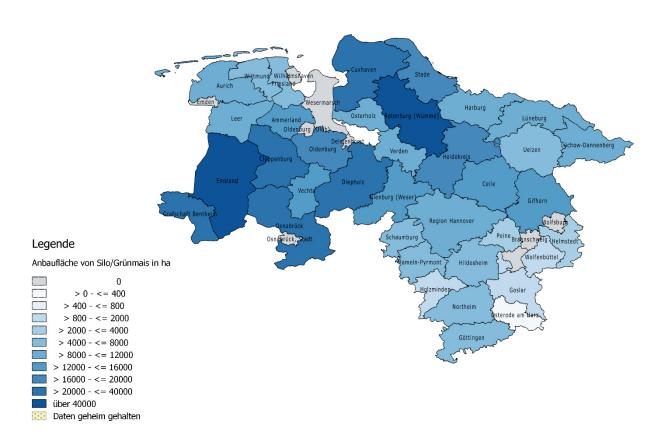
Ertragseinbußen möglich (Diepenbrock et al., 2016). Mais ist eine Sommerung mit einem sehr späten Bestandsschluss. Der Anbau von Zwischenfrüchten zur Vorbeugung von Erosion und zur Humusbildung ist sinnvoll.

Mais ist aufgrund seiner Herkunft sehr wärmeliebend, die Züchtung von frühreifen Hybriden und angepasste Ernteverfahren (Ernte als Silomais ohne volle Kornausreife) hat zu einer weiten Verbreitung des Maisanbaues geführt. Mais ist frostempfindlich (-3°C Frostschäden an Blättern) und bildet bei länger anhaltenden Temperaturen unter 10°C Kühlechlorosen auf den Blättern aus.

Mais ist eine C₄-Pflanze, d.h. sie hat einen niedrigen Transpirationskoeffizienten, jedoch ist der Wasserbedarf in der Hauptwachstumsphase dennoch hoch. Kommt es in dieser Phase zu

Wassermangel, kann es zu Störungen bei der Kolbenbildung kommen und allgemein zu Ertragseinbußen (Lütke Entrup, 2019). Eine Bewässerung von Silo/Grünmais ist meist trotzdem nicht wirtschaftlich und wird kaum durchgeführt, anders als bei Körnermais, der neben Kartoffeln und Sonderkulturen zu den bewässerungswürdigsten landwirtschaftlichen Kulturen zählt.

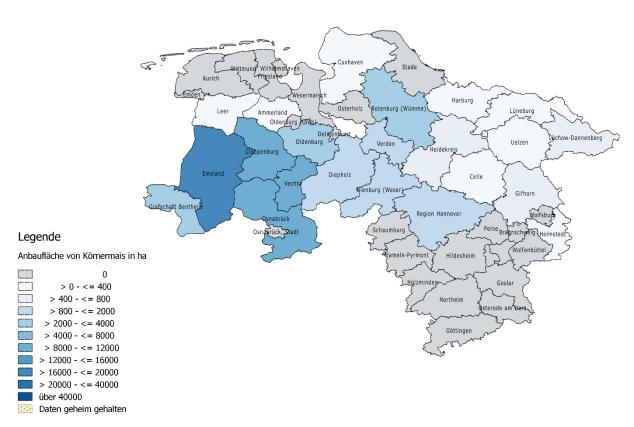
Abbildung 24: Regionale Verteilung der Anbauflächen für Silo/Grünmais in Niedersachsen 2016



Quelle: eigene Darstellung nach Daten des Stat. Landesamtes Niedersachsen

Der Anbau von Mais ist in allen Arbeitsschritten sehr stark mechanisiert. Vor der Aussaat erfolgt die Bodenbearbeitung zur Durchlüftung des Saatbettes mit Pflug (tief oder flach). Die Aussaat erfolgt Mitte April bis Mitte mit einer Drillmaschine (Drillsaat), Sägrubber (Grubbersaat) oder einem pneumatischen Einzelkorngerät (Einzelkorn) Die Unkrautbekämpfung erfolgt in Kombination aus mechanischer und chemischen Maßnahmen und ist besonders in der Phase bis zum Bestandsschluss wichtig (Konkurrenz). Zum Einsatz kommen Hackstriegel oder andere Hackgeräte zur mechanischen Unkrautbekämpfung, Feldspritze mit unterschiedlicher Gestängebreite (bis zu 36 m) zur Ausbringung von Pflanzenschutzmitte I (Herbizide, Insektizide, Fungizide). Mais kann Nährstoffe aus organischen Verbindungen effektiver nutzen als andere Kulturpflanzenarten. Vor allem Stickstoff aus organischen Düngern wird von ihm gut genutzt, da der Hauptnährstoffbedarf und die Hauptmineralisation zeitlich zusammentreffen. Mais hat eine hohe Gülleverträglichkeit wegen einer ausgeprägter Schleimentwicklung der Wurzel (KWS, 2015). Die Ernte erfolgt mit Maisvollerntern mit beifahrenden Transportwagen, die bestimmte Höhen und Breiten erfordern.

Abbildung 25: Regionale Anbauflächen für Körnermais in Niedersachsen 2016



Quelle: eigene Darstellung nach Daten des Stat. Landesamtes Niedersachsen

Eignung zum Anbau unter Agrarphotovoltaik-Anlagen

Weselek et al. (2019) haben in ihrem Review eine Übersicht über die Literatur zum Einfluss von Verschattung (shading) auf unterschiedliche Kulturen erstellt. Für Mais zitieren sie drei Veröffentlichungen, zwei aus den USA und eine aus China. Die Studien zeigen, dass Mais auf Verschattung mit Ertragseinbußen reagiert, in Abhängigkeit vom Verschattungsgrad, der Zeitspanne und dem Entwicklungsstadium der Pflanzen. Der Ertrag an Körnern sank, weil das Korngewicht niedriger ausfiel, ebenso der Stärkegehalt der Körner, wie auch der Gehalt an Fetten und Proteinen (negativer Einfluss auf die Qualität als Futter und als Gärstoff). Gestiegen sei der dagegen der Grünmasseanteil. Ähnliche Beobachtungen machten auch Schulz et al. in Stuttgart (2019). Die in diesem Experiment künstlich mit Schattiernetzen beschatten Maispflanzen zeigten einen kleineren Wuchs, hatten längere und dünnere Blätter als die unbeschattete Kontrolle. Die Entwicklung der Pflanzen war insgesamt stark verzögert. Das Trockenmassegehalt nahm ab. Bei leichter bis mittlerer Verschattung trat eine Ertragsreduktion von 20% auf.

Mais scheint als C₄-Pflanze stark negativ auf Verschattungen zu reagieren. Sorten mit steileren aufgestellten Blättern und gleichzeitig weiteren Abständen könnten das vorhandene Licht besser ausnutzen. Eventuell gibt es Sorten bzw. Anbautechniken (Abstände), die die doch erheblichen Ertragseinbußen unter Verschattung reduzieren können. Wichtig ist eine gute Wasserversorgung, um den begrenzenden Faktor Licht auszugleichen.

3.4.3 Zuckerüben

Zuckerrüben wurden 2019 in Deutschland auf 414.300 ha angebaut. Niedersachsen ist das Bundesland mit der größten Anbaufläche, 2019 wurden hier auf 104.600 ha Zuckerrüben erzeugt (Destatis, 2020). Der Anbau wurde in den vergangenen Jahren ausgeweitet. 2016 wurden in Niedersachsen auf 86.000 ha Zuckerrüben angebaut. Die Hauptanbaugebiete liegen im südlichen Niedersachsen in den Landkreisen Hildesheim, wo 2016 auf 10.800 ha Zuckerüben erzeugt wurden, der Region Hannover mit 9.600 ha, Wolfenbüttel mit fast 8.000 ha und Uelzen mit 7.600 ha. Ha. Im Landkreis Emsland wurden 2016 auf 1.360 ha und im Landkreis Diepholz auf 1.840 ha Zuckerrüben produziert ((Landesamt für Statistik Niedersachsen (a)).

Neben der Zuckererzeugung werden Zuckerrüben auch zur Produktion von Bioethanol angebaut.

Ideale Böden für Zuckerrüben sind tiefgründige, fruchtbare Lößböden mit einem pH-Wert um 7, aber auch Sandböden mit eventueller Zusatzberegnung sind geeignet.

Zuckerüben sind eine gute Vorfrucht, durch die Ernterückstände sind sie ein guter Nährstofflieferant (N- und K-Quellen) und hinterlassen einen unkrautarmen Boden. Als Folgekultur sind alle landwirtschaftlichen Kulturen mit später Herbst- oder Frühjahrsaussaat geeignet. Als Vorfrucht sind geeignet Zwischenfrüchte wie Ölrettich und Senf aber auch Getreide, Mais, Roggen oder Luzerne. Damit wird der Entwicklungskreislauf von Nematoden durchbrochen, der auch die Selbstverträglichkeit von Zuckerüben einschränkt.

Die Aussaat findet im zeitigen Frühjahr ab einer Bodentemperatur von 5°C statt im Reihenabstand 40 bis 50 cm und in der Reihe von 18 bis 20 cm. Herbizid-und Insektizidbehandlungen oder maschinelle Unkrautbekämpfung mit Maschinehacke finden im weiteren Kulturverlauf statt.

Zuckerrüben benötigen zur Bildung von Trockenmasse weniger Wasser als andere landwirtschaftliche Kulturen. Mit ihren tiefereichenden Wurzeln (bis zu 2m) könne sie auch Wasseraus tieferen Bodenschichten nutzen. In ihre Hauptwachstumsphase im Hochsommer benötigen sie viel Wasser, so dass oft eine Zusatzberegnung (Überkopfberegnung) stattfindet, besonders wenn auch tiefere Bodenschichten ausgetrocknet sind. Licht wird von Zuckerrüben gut ausgenutzt,da sie mit Reihenschluss einen Blattflächenindex von 3 bis 4 erreichen. Ein Bestand erreicht unter günstigen Umweltbedingungen einen Trockenmassezuwachs von 250 kg TM je ha und Tag. Ab August dominiert das Rübenwachstum, die Blattmasse geht zurück und der Blattflächenindex sinkt auf 2. 60 bis 70% der Assimilate werden in den Rübenkörper eingelagert. Sinkt jedoch die Lichtintensität, kommt es zu Einbußen der inneren Qualität, weil weniger Saccharose eingelagert wird. Ziel ist, es deshalb, eine schnelle Blattbildungsphase zu erreichen und die Blattseneszenz im Herbst zu verzögern (Diepenbrock et al, 2014).

Die Ernte erfolgt im Herbst oft mit einer sechsreihigen selbstfahrende Köpfrodebunkermaschine, zwölfreihige Erntegeräte sind vereinzelt im Einsatz. Oft erledigen Lohnunternehmen die Ernte und den Transport zu den Zuckerfabriken.

Zuckerrüben

Beta vulgaris L. var. altissima Döll

Chenopodiaceae (Gänsefußgewächse)

Die erste Zuckerüben war die 1786 weiße schlesische Zuckerrübe, die Ende des 18. Jahrhunderts gezüchtet wurde. Zuckerrüben haben heute einen Zuckergehalt bis zu 20% Sie sind Tiefwurzler bis zu 2 Meter. Produktionsziel ist ein hoher Saccharoseanteil in der Rübe.

Verwendung

Zuckerrüben werden zur Herstellung von Zucker und Bioethanol angebaut.

Eignung zum Anbau unter Agrarphotovoltaik-Anlagen

Ziel des Anbaus von Zuckerrüben ist es, einen hohen Gehalt an Saccharose in der Rübe zu erhalten. Pro ha sind 100 bis zu 200 dt Zucker möglich. (Diepenbrock et al, 2014). S. 222). Für die Einlagerung der wichtigen Saccharose ist eine hohe Lichtintensität ab August wichtig. Daher hat eine Verschattung in dieser Zeit, aber auch in der Zeit der Blattmasseproduktion negative Auswirkungen auf den Ernteertrag und insbesondere auf die innere Qualität der Rüben. Zuckerrüben sind daher relativ ungeeignet für die Produktion unter APV-Anlagen unter den Klimabedingungen in Niedersachsen.

3.4.4. Raps

Raps wird überwiegend als Winterraps mit Aussaat im Herbst angebaut. 2019 wurde die Rapsanbaufläche in Deutschland kräftig eingeschränkt um 30% auf 857.500 ha (Destatis 2019). Ursache war die Trockenheit im Vorjahr, die zu sehr niedrigen Hektarerträgen geführt hat. In Niedersachsen wurden 2019 auf 75.500 ha Winterraps erzeugt, 2016 fand der Anbau auf 121.500 ha statt. Winterraps wird überwiegend im östlichen Niedersachsen angebaut. Die Landkreise mit den größten Rapsflächen waren 2016 Göttingen und die Region Hannover mit jeweils etwa 9.400 ha gefolgt von Diepholz mit 7.600 ha und Nienburg mit 7.300 ha (Landesamt für Statistik, Niedersachsen (a)).

Für den Rapsanbau geeignet sind tiefgründige Böden ohne Staunässe und Verdichtungen mit pH-Wert 6,5 bis 7. Wichtig ist eine gute Wasserversorgung (hohe Feldkapazität des Bodens bzw. hohe eine die Niederschlagsmenge). Winterraps nutzt Winterfeuchte des Bodens durch seine frühe Hauptwachstumsphase gut aus. Winterraps ist wegen Pilzkrankheiten und Schädlingen selbstunverträglich und sollte nur alle drei Jahre auf derselben Fläche angebaut werden. Raps bietet von allen marktbedeutenden Hackund Blattfrüchten den besten Vorfruchtwert. In engen

Winterraps

(Brassica napus L. ssp. oleifera (Metzg.) Sinsk.)

Brassicaceae (Kreuzblütler)

Raps ist die bedeutendste Ölfrucht des gemäßigten Klimas. Ab Mitte der 1970er Jahre Neuzüchtungen von Sorten (00-Raps), dank derer er in der Lebensmittelproduktion und als Futter verwendet werden kann. Ausweitung des Anbaus.

Verwendung:

Rapsöl wird zur Herstellung von Speiseölen, Margarine, (25%), zur Herstellung von technischen Ölen (12%) und zur Kraftstoffgewinnung (über 60%) verwendet. Rückstände aus der Ölgewinnung (Rapskuchen, Rapsextraktionsschrot) dienen als Futtermittel.

Getreidefruchtfolgen ermöglicht der Rapsanbau eine Reduzierung von Krankheitspotentialen und eine gute Unkrautkontrolle. Raps ist zudem die am frühesten räumende Blattfrucht, was ausreichend Zeit für eine gute Bodenbearbeitung und Saatbeetbereitung für die Folgefrucht ermöglicht. Während andere Blatt- und Hackfrüchte größtenteils wasser- und humuszehrend sind, hinterlässt der Raps bis zu 600 kg Humus pro Hektar. Als Folgefrucht wird oft Wintergetreide angebaut. Als Vorfrucht sind Wintergerste, aber auch andere Getreidearten geeignet, aber auch andere früh zu erntenden Kulturen wie Frühkartoffeln, Erben oder Kleegras. Die Aussaat erfolgt von August bis September, je nach Standort. Wichtig ist, dass sich die Pflanzen bis zum Winter gut entwickeln, bis zum Spätherbst bilden sie einen Blattflächenindex von 3 bis 3,5 aus. Im Winter kann sich der Index durch tiefe Temperaturen (Abfrieren der Blätter) und geringe Lichtintensitäten auf 0,5 reduzieren. Im Frühjahr beginnt der Austrieb der Laublätter. Das Blattwachstum muss zügig erfolgen, damit eine hohe Photosyntheseleistung erreicht wird, weil zu Blütebeginn die maximale Blattfläche erreicht ist. Nach kurzer Zeit beträgt der Blattflächenindex wieder 3 bis 4. Von Blütenbeginn bis zur Reife vergehen etwa

60 Tage. Die Ernte erfolgt in der zweiten Julihälfte, wenn die Körner schwarz sind, mit einem Mähdrescher mit Zusatzeinrichtungen. Geerntet werden die Rapskörner, die später in der Ölmühle ausgepresst werden. Anbauziel bei der Rapsproduktion ist ein hoher Kornertrag bei gleichzeitig guter inneren Qualität. Moderne Rapssorten weisen einen Ölgehalt von 42 bis 47% (bezogen auf 91%TS) auf. Neben der Ölsäure, die mehr als 60% am der Gesamtfettsäure hat, sind in Rapsöl Linolsäure (20%) und Linolensäure (9%) sowie mehrere andere Fettsäuren enthalten (Lütke Entrup und Schäfer, 2011).

Eignung zum Anbau unter Agrarphotovoltaik-Anlagen

Winterraps erreicht nach der Überwinterung in einer relativ kurzen Vegetationsperiode seine Reife. Aufgrund der kurzen Wachstumsperiode in einer Zeit, in der die PAR begrenzter ist als in den Hochsommermonaten, der Bedarf jedoch hoch, ist die Kultur für den Anbau unter PV wahrscheinlich weniger geeignet. Nach Ergebnissen von zwei Untersuchungen, die Weselek et al. (2019) zitieren, hat eine reduzierte Einstrahlung Auswirkungen auf die innere Qualität der Rapskörner. In einer Untersuchung, zitiert in Weslek et al. (2019) fanden Izquierdo et al., 2009 in Argentinien heraus, dass eine Verschattung während der Kornausbildung zu Veränderungen in der Zusammensetzung der Fettsäuren führt. Der Ölsäuregehalt sank bei geringer Lichtintensität, während der Gehalt an anderen Säuren (Linol- und Linolensäure) stieg. Gaulthier, 2017 zitiert in Weselek et al. (2019) fand heraus, dass der Linolensäuregehalt einiger untersuchten Rapsgenotypen negativ mit der solaren Einstrahlung korrelierte. Neben der Ölzusammensetzung war auch der Ölgehalt reduziert. Ob es auch Auswirkungen auf die Erträge gab, wird nicht berichtet. Untersuchungen unter den klimatischen Bedingungen in Norddeutschland gibt es nicht.

3.4.5 Winterweizen

Winterweizen ist die Getreidekultur mit dem größten Anbauumfang in Deutschland. 2019 wurden in Deutschland auf 3,07 Mio. ha Winterweizen angebaut. Bayern ist mit 493.500 ha das Bundesland mit der größten Anbaufläche gefolgt von Niedersachsen mit 402.200 ha. Sachsen-Anhalt und Mecklenburg-Vorpommern folgen mit 333.600 ha bzw. 332.300 ha (Destatis, 2019).

2016 wurden in Niedersachsen nach Angaben aus der Agrarstrukturerhebung auf 404.300 ha Winterweizen angebaut. Die regionale Verteilung (siehe Abbildung 26) zeigt, dass der Schwerpunkt der Produktion in den südöstlichen Landkreisen des Landes liegt. Die größten Winterweizenflächen weist der Landkreis Hildesheim mit 33.400 ha, die Region Hannover mit 31.800 und der Landkreis Wolfenbüttel mit 26.500 ha auf (Landesamt für Statistik Niedersachsen(a)).

Winterweizen hat hohe Standortansprüche, um sein Ertragspotential voll zu entfalten. Geeignete Standorte sind kalkreiche, nährstoffreiche und tiefgründige Böden mit einem pH-Wert von 6,5 bis 7. Gute Weizenstandorte sind fruchtbare Böden wie Löß-Lehme, milde Tonböden, Braunerden und Marschböden. Aber auch auf leichteren Böden wie lehmige Sande kann Weizen angebaut werden

Winterweizen

Triticum aestivum L.

Poaceae (Süßgräser)

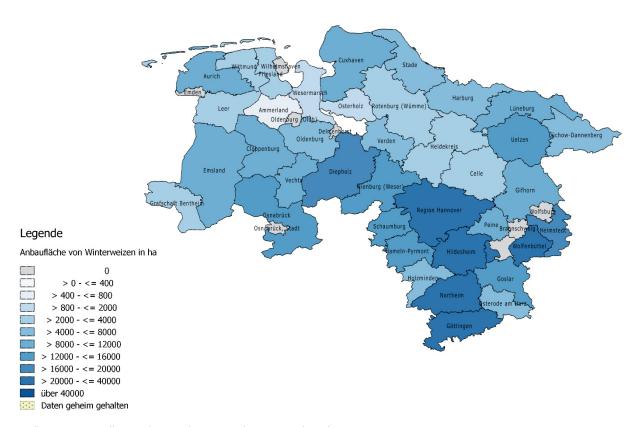
Winterweizen zählt zu den ältesten Kulturpflanzen der Menschheit. Er hat eine hohe Ertragsleistung und weist eine große
Anpassungsfähigkeit an Klima und Boden auf. Weizen besteht zu 70% aus Stärke und 10 bis 14% aus Proteine und ist gut lagerfähig. Jungpflanzen haben eine sehr hohe Kältetoleranz (bis -30°). Zur Blütenbildung ist eine Vernalisation erforderlich.

Verwendung

Nahrungsmittel (Rohstoff für Backund Teigwaren, für Brenner- und Brauereien), Industrie (Stärke), Futtermittel, Energierohstoff (Bioethanol)

(Lütke-Entrup und Schäfer, 2011). Wichtig ist eine hohe nutzbare Feldkapazität und eine gute Durchwurzelbarkeit.

Abbildung 26: Regionale Verteilung der Anbauflächen von Winterweizen in Niedersachsen 2016



Quelle: eigene Darstellung nach Daten des Stat. Landesamtes Niedersachsen

Winterweizen stellt hohe Ansprüche an den Nährstoffgehalt und die Bodengare und reagiert stark auf bodenbürtige Krankheitserreger. Gute Vorfrüchte für Winterweizen sind Winterraps, Kartoffeln und Körnerleguminosen. Bedingt geeignet sind Zuckerrüben. Mais, Hafer, sowie Luzerne, Rotklee und Kleegras. Weniger geeignet sind alle anderen Getreidearten sowie Winterweizen selbst. Trotzdem ist die Selbstfolge auf guten Weizenstandorten üblich. Ertragsrückgänge im Vergleich zu Weizen nach Blattfrucht von bis zu 20% sind jedoch einzuplanen.

Winterweizen hat durch seine lange Vegetationszeit einen höheren Wasserverbrauch als Sommergetreide. Er ist aber aufgrund seines frühzeitigen Wurzeltiefgangs und hohen Wurzelbildung besser als viele andere Fruchtarten in der Lage, den Feuchtvorrat aus tieferen Bodenschichten zu nutzen. Er besitzt daher auf speicherfähigen, tiefgründigen Böden auch in niederschlagsarmen Gebieten eine hohe Ertragsstabilität. (Guddat et al., 2015).

Winterweizen ist die Getreideart mit der größten Saatzeittoleranz. Die Aussaat kann zwischen Mitte September bis Mitte November erfolgen. Die Aussaat erfolgt nach Pflugbearbeitung bzw. pfluglos je nach Vorfrucht, Klima und Bodenverhältnissen. Eine reduzierte Bodenbearbeitung erfolgt mit Grubber und Scheibenegge. Auch eine Direktsaat ist möglich in den unbearbeiteten Boden, wenn Ernterückstände begrenzt sind und Strukturschäden gering sind (Lütke Entrup und Schäfer, 2011).

Die mechanische Unkrautbekämpfung erfolgt durch walzen, striegeln und eggen. Der Herbizideinsatz kann dann stark reduziert werden. Weitere Pflanzenschutzmaßnahmen gegen Pilze und Insekten erfolgen in der Vegetationsperiode je nach Befall mit Feldspritzen in unterschiedlichen Gestängebreiten. Im Weizenbau kommen Wachstumsregler zum Einsatz, die die Standfestigkeit der Weizenpflanze verbessern (Verhinderung von Lager). Auch sie werden mit der Feldspritze ausgebracht.

Die Ernte von Winterweizen erfolgt während der letzten Julidekade bis in die ersten beiden Augustdekaden statt. Der Mähdrusch mit Mähdrescher erfolgt bei 14 bei 17% Kornfeuchte. Bei höheren Werten muss das Korn im Lager nachgetrocknet werden. (Diepenbrock et al. 2016). Oft übernehmen Lohnunternehmen die Erntearbeiten.

Produktionsziel beim Anbau von Winterweizen ist unterschiedlich, je nachdem für welchen Verwendungszweck der Weizen produziert wird. Der Verwendung bestimmt die Sortenwahl, da viele Eigenschaften genetisch vorbestimmt sind. Die Qualitätseigenschaften von Weizen korrelieren negativ mit der Ertragshöhe. Qualitätskriterien für Weizen sind z.B. der Rohproteingehalt, die Mehlausbeute, die Wasseraufnahme und die Volumenausbeute. So ist für die Produktion von Eliteweizen mit sehr hoher Backqualität ein Mindestgehalt an Rohprotein von 14,5% erforderlich. (Lütke Entrup und Schäfer, 2011).

Eignung zum Anbau unter Agrarphotovoltaik-Anlagen

Zum Anbau von Weizen unter Agrarphotovoltaik-Anlagen bzw. aus Verschattungsexperimenten oder Versuchen zu Agroforstsysteme liegen vergleichsweise viele Ergebnisse vor. Die Ergebnisse hängen stark davon, wie hoch der Verschattungseffekt bzw. die Reduzierung der PAR ist. Weselek et al. (2019) zitieren in ihrer Veröffentlichung sechs Untersuchung zu Weizen. Ein Versuch in Belgien (Artru et al, 2017) kam zu dem Ergebnis, dass der maximale Blattflächenindex von Verschattungen nicht betroffen war, während der Strohanteil höher ausfiel. Insgesamt ergaben die Versuche einen verringerten Kornertrag und Korngröße, jedoch einen höheren Proteingehalt. Die Verschattungsrate lag hier bei 55%. Versuche in Frankreich, Kanada und China ergaben steigende Erträge für einige Sorten unter moderaten Verschattungsraten. Ein Versuch zur Verschattung in Agroforstsystemen wurde 2015 bis 2017 am Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg durchgeführt. Schulz et al. (2018) führten Versuche mit Schattierungsnetzen durch, die die solare Strahlung um 12%, 26% und um 50% im Vergleich zur Kontrolle (unbeschattet) reduzierte. Für Weizen zeigte sich 2016, ein Jahr mit heißen und trockenen Phasen, unterbrochen von regnerischen und kühleren Phasen, bei der Beschattungsvariante 50% eine stark verzögerte Druschreife. Im heißen und trockenen Jahr 2015 war dies nicht der Fall. Beim Kornertrag zeigte sich im Erntejahr 2015 erst ab einer starken Beschattung von 50 % eine signifikante Ertragsreduktion von 30 % während sich im Erntejahr 2016 auch die Erträge bei 12 % und 26 % Beschattung signifikant von jener Variante mit 50 % unterschieden. Weitere Ergebnisse waren eine signifikante Zunahme des Rohproteingehaltes in beiden Jahren mit zunehmender Beschattung.

Winterweizen reagiert auf die Reduzierung der solaren Strahlung mit Ertragsreduktion. Auch die innere Qualität verändert sich. Zwar ergaben die Versuche die Tendenz zu höheren Rohproeingehalten, was aber u.a auf die kleineren Korngrößen und geringeren Korngewichte zurückzuführen war.

Wintergerste

Wintergerste ist nach Winterweizen die zweitwichtigste Getreideart in Deutschland. 2019 wurden deutschlandweit auf 1,36 Mio. ha angebaut. In Niedersachsen wurde Wintergerste auf 126.900 ha erzeugt. Bayern ist mit 244.800 ha das Bundesland mit der größten Anbaufläche (Destatis, 2019)

In Niedersachsen waren 2016 nach Angaben aus der Agrarstrukturerhebung die Landkreise Osnabrück mit über 14.000 ha, gefolgt von den Landkreisen Nienburg mit 8.500 ha, Diepholz mit 8.300 ha und Göttingen mit fast 7.000 ha die Anbauzentren von Wintergerste ((Landesamt für Statistik Niedersachsen (a)).

Wintergerste reift sehr früh ab (ab Juni) und kann daher in Trockenjahren besser als Weizen von der noch vorhandenen Wintergerste

Hordeum vulgare L.

Poaceae

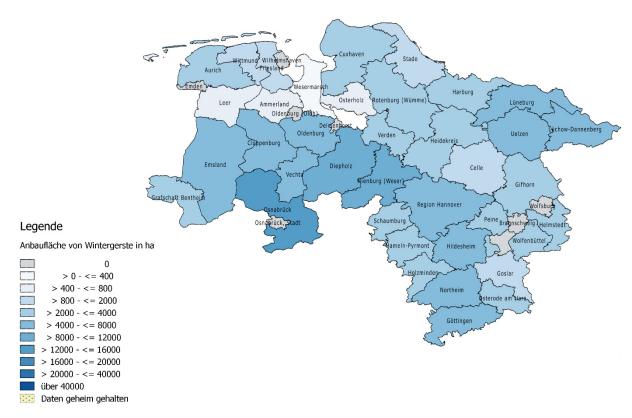
Wintergerste hat geringe Bodenansprüche und ist weniger hitzeempfindlich als Winterweizen.

Verwendung:

Futtermittel (Schweinmast)

Winterfeuchtigkeit zehren. In Regionen mit ausgeprägter Vorsommertrockenheit wird Wintergerste noch vor Winterweizen angebaut.

Abbildung 27: Regionale Verteilung der Anbauflächen von Wintergerste in Niedersachsen 2016



Quelle: eigene Darstellung nach Daten des Stat. Landesamtes Niedersachsen

Wie bei Winterweizen ist der Rohproteingehalt bei Wintergerste ein wichtiges Qualitätskriterium für die innere Qualität. Wintergeste hat deutlich geringere Bodenansprüche als Winterweizen. Eine termingerechte Aussaat zwischen dem 5. und 25. September ist wichtig. Danach richtet sich die Auswahl der Vorfrucht, in der Praxis ist dies meist Winterweizen; aber auch Erbsen, Frühkartoffel und Winterraps sind gute geeignete Vorfrüchte (Diepenbrock et al., 2016). Die Ernte erfolgt ab Mitte Juli.

Eignung zum Anbau unter Agrarphotovoltaik-Anlagen

Zu den Auswirkungen des Anbaues von Wintergerste unter Agrophotovoltaik-Anlagen gibt es kaum Untersuchungen. Ein Versuch zur Verschattung in Agroforstsystemen wurde 2015 bis 2017 am Landwirtschaftlichen Technologiezentrum Augustenberg durchgeführt. Schulz et al (2018) führten Versuche mit Schattierungsnetzen durch, hierbei wurde auch Wintergerste untersucht, allerdings nur in einem Versuchsjahr und nur für kurze Zeit. Sie kamen zu dem Ergebnis, dass ab einer Reduzierung der eingestrahlten Lichtmenge um 50 % im Vergleich zur Kontrolle ein signifikanter Ertragsrückgang beobachtet werden konnte, bei den anderen Verschattungsvarianten war dies nicht signifikant. Schönberge und Kropf (in Lütke Entrup und Schäfer 2011) erwähnen, dass seit Mitte der 1990er Jahre Wintergerste in Süddeutschland unter der höheren Strahlungsintensität leide. Möglich wäre es, dass Wintergerste weniger stark auf Verschattung reagiert als Winterweizen.

3.5 Eignung von landwirtschaftlichen Sonderkulturen

3.5.1. Kulturheidelbeeren

Kulturheidelbeeren wurden 2019 deutschlandweit auf einer Fläche von 3.162 ha produziert. Der Anbau ist den vergangenen Jahren kontinuierlich erweitert worden, zehn Jahre zuvor umfasste er mit 1.426 ha nur knapp die Hälfte der Fläche. In Niedersachsen liegt ein Anbauschwerpunkt, dort liegen befinden sich mehr als die Hälfte der bundesweiten Flächen (Destatis, 2019).

2016 verteilte sich die Anbaufläche in Niedersachsen von insgesamt 1.814 ha wie folgt auf die Landkreise: Jeweils rund 20% der niedersächsischen Anbaufläche befinden sich im Landkreis Diepholz (385 ha) und im Heidekreis (361 ha), 14% (261 ha) Nienburg (Weser). Weitere Flächen liegen im nördlichen Teil Niedersachsens in den Landkreisen Osnabrück (93 ha), Stade (60ha), Cloppenburg (55 ha) und Cuxhaven (52 ha) (siehe Abbildung 28). (Stat. Landesamt Niedersachsen, 2019 (b)).

Heidelbeeren bevorzugen saure, humose, gut durchlässige und durchlüftete Böden mit pH-Werten von 4,0 bis 5,0. Deswegen sind Wald- und Heidestandorte oder Moorböden die idealen Standorte, aber auch Ackerstandorte können durch eine gründliche Bodenverbesserung für den Anbau hergerichtet werden. Heidelbeeren bevorzugen ein gemäßigtes Klima, sie weisen eine hohe Frostverträglichkeit auf (bis -25°C), gefährlich sind jedoch Spätfröste zur Blütezeit im April bis Mai. (Frostschutzanlage). Heidelbeeren sind sehr trockenheitsempfindlich, daher werden sie oft per Tröpfchenbewässerung versorgt. Eine hohe Sonneneinstrahlung während der Fruchtausbildung erhöht

Kulturheidelbeere

Vaccinium corymbosum

Ericaceae (Heidekrautgewächse)

Stammt aus Nordamerika. Kreuzung aus *V. angustifolium* (kälteresistent) und *V. corymbosum* und anderen Vaccinium-Arten. Dadurch entstanden Sorten, die ein geringeres Kältebedürfnis haben und in wärmeren Klimaten angebaut werden können.

Wird seit Anfang des 20.
Jahrhunderts in Nordamerika
erwerbmäßig angebaut. Es gibt rund
100 Sorten. Seit den 30er Jahren
Anbau und Züchtung in
Niedersachsen (Heermann). Büsche
können bis zu 2m hoch werden.

Sorten haben unterschiedliche Reifezeiten, daher ist die Ernte über einen langen Zeitraum möglich (Juli bis Ende September).

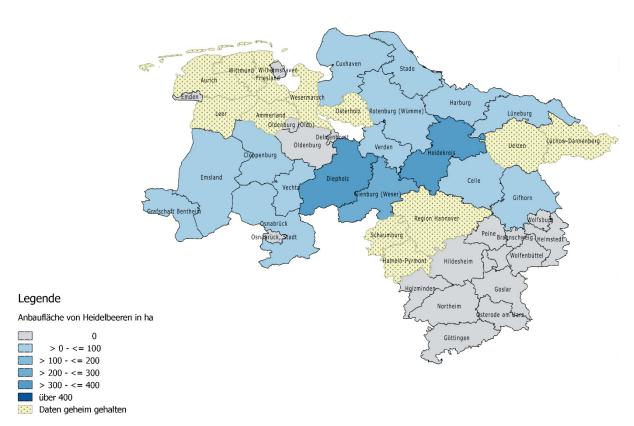
Verwendung: Frischverzehr, Tiefkühlkost, kann 6 Wochen unter CA-Bedingungen gelagert werden.

das Fruchtaroma und die Fruchtgröße. (KOB Bavendorf (a), 2020). Die Ernte erfolgt (u.a sortenabhängig) maschinell oder per Hand. Heidelbeeren sind eine Dauerkultur, der Vollertrag wird im 6. bis 8. Standjahr erreicht, die durchschnittliche Standzeit beträgt rund 20 Jahren.

Eignung zum Anbau unter Agrarphotovoltaik-Anlagen

Heidelbeeren haben mit 20 Jahren die längste Standzeit aller untersuchten Kulturen. Auch nach einer Rodung der Plantage können auf derselben Fläche nach erfolgter Bodenbearbeitung wieder Heidelbeeren kultiviert werden. Heidelbeeren brauchen zur Ausreifung jedoch ausreichend Sonnenlicht. In Japan werden sie unter anderen klimatischen Voraussetzungen unter AP-Anlagen kultiviert. Der Anbau von Heidelbeeren kommt wahrscheinlich technisch gesehen dem von Wein am nächsten. Im Weinbau gibt es in Frankeich einige Projekte, z.B. der Firma Ombrea, die erfolgreich waren bzw. sind. So konnte der Wein von der Beschattung profitieren, indem die geringere Einstrahlung dazu führte, dass der Zuckergehalt der Trauben sank. (siehe Kapitel 1.6.4, Abbildung 9). In der Veröffentlichung von Weselek et al. (2019) werden zwei Studien zitiert, in denen die Verschattung bei Heidelbeeren untersucht wurden. Die Auswirkungen auf Ernteerträge waren positiv und negativ; zudem verlängerte sich die Erntezeit in Abhängigkeit von der geographischen Lage und dem Zeitpunkt der Beschattung.

Abbildung 28: Regionale Verteilung der Anbauflächen von Kulturheidelbeeren in Niedersachsen 2016



Quelle: eigene Darstellung nach Daten des Stat. Landesamtes Niedersachsen

3.5.2 Spargel

Spargel wurde 2019 deutschlandweit auf insgesamt 22.900 ha produziert, 500 ha weniger als im Vorjahr (Destatis, 2020). Niedersachsen ist ein Hauptanbaugebiet in Deutschland. 2016 wurde hier auf einer Fläche von 5.926 ha Spargel erzeugt, knapp 1.000 ha davon waren Junganlagen. Damit lag rund ein Viertel der bundesweiten Flächen in Niedersachsen (Landesamt für Statistik Niedersachsen (2019) (c).

Schwerpunktmäßig wird Spargel in den Landkreisen Nienburg, Diepholz, Osnabrück, Celle und im Heidekreis produziert. Auch in der Region Hannover gibt es größere Flächen (siehe Abbildung 29).

Für den Spargelanbau eignen sich leichtere, humushaltige Sandböden besonders gut, der Anbau ist aber dank moderner Dammtechnik und dem Einsatz von Mulchfolien auch auf schweren Lehmböden möglich. Der ph-Wert sollte bei 5 bis 6 liegen.

Die Spargelkultur erfordert viel Spezialtechnik, die oft von Lohnunternehmen vorgehalten wird. Spargel ist eine Raumkultur mit einer Auswuchshöhe von über 2m und einer Breite bis 1,80m. Daher kommen im Spargelanabau gerade für die Applikation von Pflanzenschutzmittel Fahrzeuge mit breitem Spritzgestänge zum Einsatz. Im Februar bis April werden die Dämme ausschließlich

Spargel

Asparagus officinalis

Asparagaceae (Spargelgewächse)

Steppenpflanze aus Vorderasien. Wurde schon in der Antike als Delikatesse und Heilpflanze geschätzt und kultviert. Seit Mitte der 18. Jhd. In Deutschland in landwirtschaftlicher Produktion.

Spargel ist eine mehrjährige krautige Pflanze mit Rhizom, Speicherwurzeln und Faserwurzeln, die Wurzeln können bis zu 2m Tiefe erreichen.

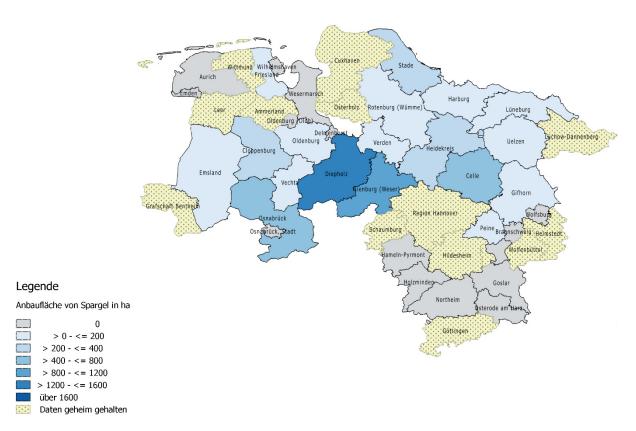
Es gibt Grün- und Bleichspargelsorten. Die Sorten sind rein männlich, da ein Samenansatz unterwünscht ist.

Verwendung: In Deutschland Anbau überwiegend für den Frischmarkt. Lagerung in Kühllagern bis zu 14 Tagen möglich, in CA-Lagern auch bis zu vier Wochen möglich.

maschinell gezogen, die mit zunehmender Standdauer höher werden. Der Reihenabstand richtet sich nach den im Betrieb bzw. beim Lohnunternehmer vorhandenen Geräten und Maschinen (z. B. Scheibenpflug zum Aufdämmen). Er kann 1,60 m bis zu 2,00 m betragen. Bei größeren Anlagen, beim Einsatz von eigenen Geräten und bei der Einsaat von Gründüngung zwischen die Reihen muss der Abstand der Reihen jedoch mindestens 1,70 m bis 2,00 m betragen. Beim späteren Anhäufeln kann der Boden dann flacher für den Damm entnommen werden. So werden Wurzelbeschädigungen weitgehend vermieden.

Schwarze-weiße und/oder transparente Folie wird auf die Dämme gezogen. Es kommen auch Mehrfachabdeckungen und Kleintunnelsysteme zum Einsatz. Ziel ist es, mit dem Folieneinsatz die optimale Dammtemperatur und damit die Erntemengen und die Qualitäten zu steuern. Die Ernte erfolgt überwiegend per Hand, zum Teil mit selbstfahrenden Erntehilfen zur Ablage. Vollerntemaschinen werden relativ selten eingesetzt, da die Ernteverluste hoch sind. Nach der Ernte im Juni wird die Folie entfernt. Nun beginnt die Assimiliationsphase von 3-4 Monaten (Juni-September), in der die Spargelpflanzen durch Photosynthese Reservestoffe bilden, die in den Speicherwurzeln eingelagert werden. Es erfolgen Düngung nach Bedarf, Pflanzenschutzbehandlungen (gegen Spargelfliege) und die Unkrautbekämpfung. Beregnungsmaßnahmen (meist Überkronenbewässerung, auch Tröpfchenbewässerung) werden schon in der Austriebsphase durchgeführt. Bis Ende August wird beregnet. Ab September wird sie eingestellt, der Aufwuchs stirbt ab und wird eingearbeitet.

Abbildung 29: Regionale Verteilung von Anbauflächen von Spargel in Niedersachsen 2016



Quelle: eigene Darstellung nach Daten des Stat. Landesamtes Niedersachsen

Spargel ist eine Dauerkultur mit einer Standzeit von 8-12 Jahren. Wenn möglich sollte Spargel nicht direkt wieder nach Spargel gepflanzt werden, vor allem wegen des Auftretens von Wurzelkrankheiten. Nach Durchführung geeigneter Maßnahmen (intensive Bodenbearbeitung, Gründüngung, anaerobe Bodendesinfektion) ist eine Neupflanzung nach Umbruch der Altanlage im Folgejahr möglich oder nach einer Anbaupause von 7-8 Jahren (Laber und Lattauschke, 2014).

Als Vorfrüchte für Spargel sind Hack- und Hülsenfrüchte, Getreide und Gründüngungspflanzen geeignet. Ungeeignet sind Luzerne, Klee und Mais, da unter anderem durch sie der Befall mit Wurzelkrankheiten verstärkt werden kann.

Eignung zum Anbau unter Agrarphotovoltaik-Anlagen

Spargel ist eine Dauerkultur mit einer Standzeit bis zu 12 Jahren und kann nach geeigneten Maßnahmen auch im Folgejahr wieder auf der gleichen Fläche angebaut werden. Ein Anbau unter APV-Anlagen ist aufgrund der langen Standzeit möglich. Der Einsatz von Maschinen im Kulturablauf ist vielfältig, oft kommen große Maschinen zum Einsatz. Die durchgewachsenen Spargelpflanzen können eine Höhe von 2,00 m erreichen. Daher ist es wichtig, genügend Abstand für die Kultur und die eingesetzten Maschinen zu belassen (4-5 m ähnlich wie bei den Ackerkulturen). Untersuchungen zur Auswirkung auf die Assimilationsleistung durch eventuelle Verschattungen in den Sommermonaten gibt es nicht. Es ist jedoch anzunehmen, dass Spargel aufgrund seiner Herkunft, (Steppe) sehr lichtbedürftig ist. Eine eingeschränkte Assimilatbildung und Speicherung hätte starke Auswirkungen auf die Ernteergebnisse im kommenden Jahr.

3.5.3 Erdbeeren

Erdbeeren wurden 2018 in Deutschland auf 17.701 ha angebaut, davon 1.503 ha im geschützten Anbau (unter hohen begehbaren Schutzabdeckungen einschl. Gewächshäusern). Nach Nordrhein-Westfalen weist Niedersachsen die größte Anbaufläche von Erdbeeren auf (Destatis, 2019).

In Niedersachsen wurden 2016 (Landesamt für Statistik Niedersachsen (2019) (d)) auf einer Fläche von 3.952 ha Erdbeeren erzeugt, davon befanden sich 3.313 ha im Ertrag. Auf 94 ha wurden Erdbeeren unter hohen begehbaren Schutzabdeckungen angebaut, d.h. begehbaren Folientunneln oder in Gewächshäusern. Erdbeeren werden auch in Deutschland zunehmend unter Schutzeinrichtungen wie Folientunneln produziert, während die Produktion auf Freilandflächen zurückgeht. In einigen europäischen Nachbarländern wird der Großteil der Produktion bereits geschützt in Folientunneln oder Gewächshäusern produziert, so in den Niederlanden und in Frankreich (Spargel-Erdbeerprofi, 2017). Vorteile des geschützten Anbaus sind eine Verlängerung der Saison, bessere Steuerung der Produktionsbedingungen und eine höhere Arbeitsproduktivität.

Hauptproduktionsgebiet in Niedersachsen ist der Landkreis Vechta mit einer Fläche von 1.640 ha, gefolgt von der Region Hannover mit 370 ha und den Landkreisen

Erdbeeren

Fragaria x ananassa

Rosaceae

Stammt aus Kreuzung von *F. virginiana* (amerikanische Scharlach-Erdbeere) und *F. chiloensis* (Chile-Erdbeere), um 1750 in Frankreich gezüchtet. Anbau in Deutschland ab Mitte des 19. Jahrhunderts. In Deutschland werden mehr als 50 Sorten angebaut.

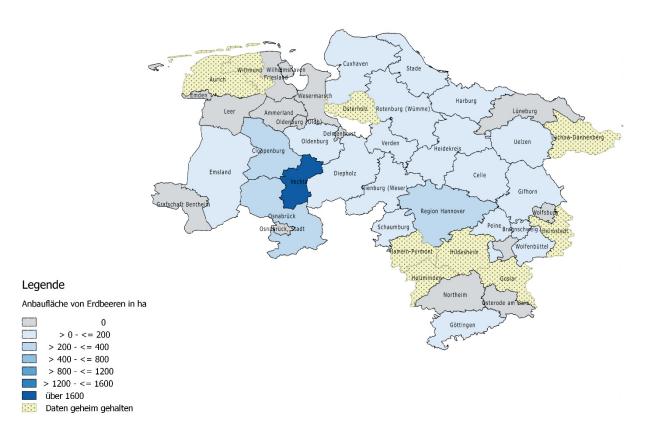
Erdbeeren sind mehrjährige Pflanzen. Sie werden im Erwerbsanbau aber meist nur 1-2 Jahre kultviert. Anbau erfolgt im Freiland unter Vlies, in Tunneln, in Tunneln auf Stellage oder in Gewächshäusern auf Substraten. Erntezeit von Mai bis September.

Produktion für den Frischmarkt und auch für die Verarbeitung. Sehr eingeschränkte Lagerung.

Cloppenburg und Diepholz mit 274 ha bzw. 196 ha. Der Regierungsbezirk Weser-Ems ist mit 2.455 ha der Bezirk mit der größten Fläche, zu dem auch der Landkreis Vechta zählt (Landesamt für Statistik, 2019).

Für den Anbau von Erdbeeren eigen sich humose tiefgründige Böden mit einem neutralen bis schwach saurem pH-Wert. Nach dem Anbau von Erdbeeren sollte eine Anbaubaupause von 4-5 Jahren eingehalten werden, um Wurzelkrankheiten zu vermeiden. Als Vorkultur sind insbesondere Getreidearten oder Gräsermischungen (Kunstwiese) geeignet. Bestimmte Gemüsearten mit kurzer Kulturdauer sind nur bedingt geeignet, da sie Wurzelkrankheiten übertragen können (Wirtspflanze). Als Nachkultur können verschiedene Gemüsearten gepflanzt werden oder Getreide angebaut werden.

Abbildung 30: Regionale Verteilung der Anbauflächen von Erdbeeren in Niedersachsen 2016



Quelle: eigene Darstellung nach Daten des Landesamtes für Statistik, Niedersachsen

Erdbeeren werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten gepflanzt, je nach Anbausystem. Es werden unterschieden:

- Jungpflanzen als Grünpflanze (klassische Art, mit 2-3 Blättern und gut ausgebildetem Wurzelwerk, Die Pflanzung erfolgt im August, wobei oft eine Beregnung notwendig ist.
- Jungpflanze als Frigopflanze für die Terminkultur. Sie besteht aus Rhizom und Wurzelwerk (wurzelnackt). Die Vermehrungspflanzen werden im Dez. gerodet und bei –2°C eingelagert. Sie werden ab März bis Juni gepflanzt und tragen nach 10 Wochen die ersten Früchte
- Jungpflanzen als Topfpflanze mit Wurzelballen. Sie sind geeignet für eine frühe Pflanzung, sind aber vergleichsweise teuer (KOB Bavendorf (b), 2020).

Erdbeeren sind mehrjährig, sie werden im Erwerbsanbau aber nur als ein bis zweijährige Kultur angebaut, da die Wüchsigkeit, der Ertrag und die Beerengröße abnimmt. Mehrjährige Kulturen können für Selbstpflücke und Erzeugung von Verarbeitungsware interessant sein.

Erdbeeren werden in unterschiedlichen Produktionssystemen erzeugt. Ziel ist es, eine Verfügbarkeit der Früchte von April bis September zu erreichen. Erdbeeren werden in Deutschland im Freiland in Flachabdeckung (mit Vlies- und/oder Lochfolie) angebaut, wodurch eine Verfrühung von 10 Tagen erreicht wird. Die Produktion kann durch den Anbau in Hoch-bzw. Wandertunneln (z.T. nicht begehbar, Pflanzen wachsen im Boden oder auf Substratdämmen) verfrüht werden. Verbreitung gefunden hat seit einiger Zeit auch der Anbau in hohen begehbaren Tunnel auf Stellagen in Substraten, wodurch gleichzeitig die Ernte vereinfacht wird. erfolgen. Auch ein Anbau in beheizbaren Gewächshäusern ist möglich. Oft wird im Freiland eine schwarze Mulchfolie eingesetzt, um den Unkrautbewuchs zu regulieren und eine weitere Verfrühung zu erreichen. Die Pflanzung in Dämmen

(Einfach- oder Doppelpflanzung) und der Einsatz von Mulchfolie ermöglichen den Anbau auch auf schweren Böden. Mit einer Strohabdeckung im Spätwinter kann der Austrieb und die Ernte verzögert werden. Die Ernte dauert je nach Sorte und Witterung 3-4 Wochen, wobei alle 2-3 Tage überpflückt wird. Remontierende Sorten können länger beerntet werden.

Im Erwerbsanbau wird je nach Maschinenausstattung im Freiland ein Reihenabstand von 90cm und ein Pflanzabstand von 35cm empfohlen. Beim Einzelreihenanbau werden so etwa 30.000 Pfl./ ha gesetzt. Die Unkrautregulierung erfolgt meist mechanisch durch Striegel und Handhacke, ein Herbizideinsatz ist nur sehr eingeschränkt möglich.

Eignung zum Anbau unter Agrarphotovoltaik-Anlagen

Der Anbau von Erdbeeren im Freiland verlangt eine Fruchtfolge, da die Standzeit der Kultur mit ein oder höchstens zwei Jahre beträgt und eine direkte Neupflanzung mit Erdbeeren aus phytosanitären Gründen nicht empfohlen wird. Erdbeeren sind daher in die Anbauplanungen eines Gemüsebaubetriebes oder eines landwirtschaftlichen Betriebes aufzunehmen. Oft erfolgt auch ein Flächentausch mit benachbarten landwirtschaftlichen Betrieben. Der stationäre Anbau in Folientunneln auf Substratdämmen oder auf Stellagen dagegen ist unabhängig vom Boden d.h. ein Fruchtwechsel ist hier nicht nötig, stattdessen muss das Substrat getauscht werden. Hier wäre eine Installation von Photovoltaikpanels über den Folientunneln denkbar, die eine Verschattung verursachen. Inwieweit dies sich negativ auf die Erträge bzw. Qualitäten der Erdbeeren in den Folientunneln auswirkt, muss untersucht werden. Eine Installation auf Freilandflächen dürfte bei Erdbeeren eher von Nachteil sein und durch den notwendigen Fruchtwechsel schwieriger umzusetzen sein. Praxisversuche mit Erdbeeren gibt es noch nicht.

3.6. Ergebnisse der Untersuchungen

Bei vielen landwirtschaftlichen Kulturen, für die Untersuchungen zur Wirkungen von reduzierter Einstrahlung vorliegen, gab es neben Auswirkungen auf die Ertragshöhe auch Auswirkungen auf die innere Qualität des Erntegutes. Für viele Kulturen wie z.B. Zuckerrüben, Raps, Getreide aber auch Mais, die als Rohstoff für die Weiterverarbeitung bzw. als Futtermittel verwendet werden, ist das Erreichen bestimmter Qualitätskriterien wie bestimmte Mindestgehalte an bestimmten Inhaltsstoffen wie Öl, Zucker, Stärke etc. wichtig für die Vermarktung und die Preisgestaltung. Bei Kulturen, die nicht weiterverarbeitet werden, sondern für den Frischverzehr verwendet werden, sind die Toleranzgrenzen für die innere Qualität eventuell etwas größer, wie z.B. bei Heidelbeeren oder Erdbeeren. wo z.B. es Geschmackseinbußen aufgrund geringerer Zuckergehalte geben kann, aber keine vorgeschriebene Mindestgehalte an bestimmten Inhaltsstoffen einer Vermarktung im Wege stehen.

Von den Kulturen, die im Untersuchungsgebiet westliches Niedersachsen angebaut werden, sind bedingt geeignet: Kartoffeln, Heidelbeeren und Erdbeeren im geschützten Anbau.

- Kartoffeln sind Teil der landwirtschaftlichen Fruchtfolge, d.h. sie werden nur für eine bestimmte Zeit auf dem Acker angebaut (4 bis 6 Monate). Danach und davor erfolgt eine andere landwirtschaftliche Kultur als Vor- oder Folgefrucht. Unter einer Agrarphotovoltaik-Anlage wechselt die Kultur je nach Kulturdauer alle 3 bis 12 Monate.
- Erdbeeren im geschützten Anbau werden bodenunabhängig kultiviert, d.h. die Standfläche bleibt dieselbe, nur das Substrat wird gewechselt. Dort würde sich eine Installation einer APV-Anlage über den Tunneln anbieten, da diese an sich schon einen größeren Eingriff in die Landschaft darstellen und die vorhandene Infrastruktur eventuell mitgenutzt werden könnte.
- Bei Heidelbeeren handelt es sich um eine Dauerkultur, die eine Standdauer von bis zu 20 Jahre hat und auch nach einer umfangreichen Bodenbearbeitung erneut aus dem gleichen Standort angebaut werden kann. Auch hier würde sich eine Installation über den Reihen anbieten und schon vorhanden Infrastruktur eventuell mitgenutzt werden können.

Weselek et al. (2019) weisen darauf hin, dass der Einfluss von Verschattungen auf die Ernteerträge davon anhängt, welches Pflanzenteil geerntet wird. Wird nur der vegetative Teil einer Pflanze geerntet wie bei Futterpflanzen oder Blattgemüse (z.B. Salat) kann der Ertrag steigen, weil die Pflanzen mit einer vergrößerten Blattfläche und einer höheren Biomasseproduktion reagieren. Schattentolerante Sorte zeigte eine Reihe von Anpassungsstrategien wie eine größere Blattmasse, eine andere Blattausrichtung, und morphologische Veränderungen der Blätter (größere und längere, aber dünner Blätter, dafür weniger Blätter) (siehe Kapitel 2.1.4). Daher wären auch verschieden Blattgemüsearten für einen Anbau unter APV-Anlagen geeignet, die aber in diesem Bericht nicht näher untersucht wurden. Zudem ist bei diesen Kulturen aufgrund der kurzen Kulturzeit (einige Wochen) ein noch häufigerer Fruchtwechsle erforderlich.

4 Zusammenfassung

Niedersachsen erscheint zum jetzigen Zeitpunkt als Standort für großflächige Agrarphotovoltaik-Anlagen weniger geeignet. Die Synergieeffekte sind gering, die negativen Auswirkungen durch Verschattung dürften bei den in Niedersachsen im Anbau befindlichen landwirtschaftlichen Kulturen überwiegen. Neben Ertragseinbußen sind auch negative Auswirkungen auf die innere Qualität der Produkte wahrscheinlich.

Der erforderliche Fruchtwechsel, der in der landwirtschaftlichen Produktion erforderlich ist, stellt eine besondere Herausforderung in der großflächigen Nutzung der Flächen unter APV-Anlagen dar. Unter einer APV-Anlage muss der Anbau einer großen Zahl von Kulturpflanzen möglich sein und damit verbunden auch der Einsatz von sehr unterschiedlichen landwirtschaftlichen Geräten. So erfordert als Beispiel der Anbau von Winterweizen weite Abstände in der Breite, damit auch mit breiten Spritzgestänge gearbeitet werden kann (für die Ausbringung von Pflanzenschutzmitteln etc.). Wenn in einem anderen Jahr Mais als Hauptkultur angebaut wird, erfordert dies eine große Arbeitshöhe undbreite, damit ein Maishäcksler die Fläche befahren kann.

Der kleinflächige Einsatz über Sonderkulturen wie Heidelbeeren, anderen Strauchbeeren oder bestimmten Gemüsearten (Blattgemüse) wäre eventuell ertragsneutral, bei Blattgemüse eventuell sogar vorteilhaft. Allerdings ist auch im Gemüsebau ein Fruchtwechsel unter Einbeziehung von landwirtschaftlichen Kulturen erforderlich, bei Blattgemüsekulturen wäre dieser aufgrund der kurzen Kulturdauer noch häufiger notwendig.

Zusätzlich gibt es einige weitere Faktoren, die die den Anbau von landwirtschaftlichen Kulturen unter APV-Anlagen beeinflussen. Durch die neue Düngeverordnung, die 2020 in Kraft tritt, sind Ertragsreduktionen in einigen landwirtschaftlichen Kulturen wahrscheinlich, die sich zusätzlich zu den durch den Anbau unter APV-Anlagen verursachten Ertragsreduktionen addieren. Die von den Einschränkungen betroffenen roten Gebieten in Niedersachsen korrelieren zu einem großen Teil mit den bevorzugten Gebieten für APV-Anlagen (siehe Kapitel 1.7).

Anderseits gibt es auch Faktoren, die einen Anbau unter APV-Anlagen in Zukunft begünstigen könnten. Durch den sich wahrscheinlich durch den Klimawandel fortsetzten Trend zu einer höheren Globalstrahlung (siehe Abbildung 18) und höheren Temperaturen, werden sich die Stressfaktoren, die auf Kulturpflanzen einwirken, erhöhen. Durch den Anbau unter Agrarphotovoltaikanlagen könnte dieser Stress wie auch Versuche aus ariden Gebieten zeigen, abgemildert werden. Synergieeffekte wären dann auch beim Anbau in Niedersachsen für den Anbau von land- und gartenbaulichen Kulturpflanzen denkbar.

5 Fazit

Um eine Umsetzung des Anbaus von landwirtschaftlichen Kulturen unter Agrarphotovoltaikanlagen zu erreichen, ist ein noch großer Forschungsbedarf vorhanden. Versuche unter praxistauglichen Agrarphotovoltaikanlagen in verschiedenen Standorten in Niedersachsen sind unverzichtbar, um praxisrelevante Ergebnisse zu erlangen. Zudem muss eine rechtliche Rahmensetzung erfolgen, in der Anreize aber auch Kontrollinstrumente festgelegt werden. Zum einen müssen die bestehenden Flächenprämien auch für die landwirtschaftliche Nutzung unter APV-Flächen gezahlt werden, was gegenwärtig nicht der Fall ist. Eine staatliche Förderung von APV wie in Japan oder den USA sollte an Bedingungen geknüpft werden. Ohne staatliche Förderung wird ein Anbau von landwirtschaftlichen Kulturen unter Agrarphotovoltaik unter den gegenwärtigen Bedingungen wahrscheinlich nicht realisiert werden.

Quellenverzeichnis

Agentur für Erneuerbare Energien (2020): Bundesländer-Übersicht zur Erneuerbaren Energien –Solar; https://www.foederal-erneuerbar.de/uebersicht/bundeslaende

Agrophotovoltaik.de (2020): Erfoolgsgeschchiten7Italien/Norditalien; ww.agrophotovoltaik.de/weiterfuhrende-informationen/erfolgsgeschichten/italien/

Awater-Esper,S. (2019): Neue Düngeverordnung soll ab April 2020 gelten, topagrar online; https://www.topagrar.com/acker/news/neue-duengeverordnung-soll-ab-april-2020-gelten-11837988.html

Bavendorf (KOB), 2020 (a): Kompentenzzentrum Obstbau-Bodensee, Erdbeere; http://www.kob-bavendorf.de/Service/kulturbeschreibungen/beerenobst/erdbeere

Bavendorf (KOB) 2020 (b): Kompentenzzentrum Obstbau-Bodensee, Kulturheidelbeere; http://www.kob-bavendorf.de/Service/kulturbeschreibungen/beerenobst/kulturheidelbeere

Badelt, O., 2019: Freiflächenphotovoltaik-Potential in Niedersachsen – Flächenbilanz und räumliche Verteilung, Vortrag auf dem 2. Beiratstreffen zum Forschungsvorhaben "Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft", Leibniz Universität Hannover, Institut für Umweltplanung

Barron-Gafford, G.A. et al. (2019): Agrovoltaics provide mutual benefits across the food—energy—water nexus in drylands, Nature Sustainability 2, S. 848-855; DOI: http://dx.doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5

Bayerischer Bauernverband (2019): Photovoltaik-Freiflächenanlagen - Stellungnahme der Präsidentenkonferenz, https://www.bayerischerbauernverband.de/themen-erzeugervermarktung/energie/photovoltaik-freiflaechenanlagen-8246

Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (2011): Klimaänderung in Bayern, Lfl Jahrestagung 9. Kulturlandschaftstag, Tagungsband, Schriftenreihe 6/2011

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) (BMVI) (2015): Räumlich differenzierte Flächen-potentiale für erneuerbare Energien in Deutschland, BMVI-Online-Publikation, Nr. 08/2015,

https://www.bbr.bund.de/BBSR/DE/Veroeffentlichungen/ministerien/BMVI/BMVIOnline/2015/DL_B MVI_Online_08_15.pdf?__blob=publicationFile&v=2)

Bundesregierung (2019): Klimaschutzprogramm 2030 der Bundesregierung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050, S. 39. Bundesministerium für Umwelt, Natur und Reaktorsicherheit https://www.bundesregierung.de/resource/blob/975226/1679914/e01d6bd855f09bf05cf7498e06d0 a3ff/2019-10-09-klima-massnahmen-data.pdf?download=1

BMJV (2017): Gesetz für den Ausbau erneuerbare Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz-EEG 2017); Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz (BMJV), Berlin https://www.gesetze-iminternet.de/eeg_2014/BJNR106610014.html)

Brohm, Rainer et al. (2018): Dual-use Approaches for Solar Energy and Food Production - International Experiences and Potentials for Vietnam; http://rainer-brohm.de/wp-content/uploads/2019/02/Dual-use-approaches-for-solar-energy-and-food-production-international-experience_en.pdf

Destatis (2019): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Wachstum und Ernte, Feldfrüchte, Fachserie 3, Reihe 3.2.1, Statistisches Bundesamt, Bonn

Deutscher Wetterdienst (2020): Globalstrahlungskarten, Mittlere Monats- und Jahressummen; https://www.dwd.de/DE/leistungen/solarenergie/lstrahlungskarten_mi.html?nn=510076

Diepenbrock, W., Ellmer, F. und León, J. (2016): Ackerbau, Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung, 4. überarbeitete Auflage, Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart

Drees, T., Wiede, T, Meinecke M. und König, R. (2020): Szenariorahmen zum Netzentwicklungsplan Strom 2035, Version 2021, Entwurf der Übertragungsnetzbetreiber,

https://www.netzausbau.de/SharedDocs/Downloads/DE/2035/SR/Szenariorahmen_2035_Entwurf.pdf?__blob=publicationFile

EnBW (2020): Baustart für Deutschlands größten förderfreien Solarpark; Pressemitteilung EnBW Energie Baden-Württemberg AG; https://www.enbw.com/unternehmen/presse/baustart-fuer-solarpark-weesow-willmersdorf.html

EUPD Research (2019): "Energiewende im Kontext von Atom- und Kohleausstieg – Perspektiven im Strommarkt bis 2040", Zusammenfassung der Studie (Vorabversion),

https://www.solarwirtschaft.de/fileadmin/user_upload/EuPD_zusammenfassung_studie_strommark t.pdf

Herbert, Stephen (2018): Vegetables under Solar PV 2016-17;

https://ag.umass.edu/sites/ag.umass.edu/files/pdf%2Cdoc%2Cppt/crop_yield_comparisons_2016_-_2017_umass_farm_nrel_co-location_project.pdf

Kelm, T., Metzger, J. Fuchs, A.L., Schicketanz, S., Günnewig, D. und Thylmann, M. (2019): Untersuchung zur Wirkung veränderter Flächenrestriktionen für PV-Freiflächenanlagen, Kurzstudie im Auftrag der innogy, SE, Zentrum für Sonnenergie – und Wasserstoffforschung Baden-Württemberg und Bosch&Partner, GmbH; https://www.zsw-

 $bw. de/file admin/user_upload/PDFs/Aktuelles/2019/politischer-dialog-pv-freiflaechen anlagen-studie-333788.pdf$

Klimaschutz- und Energieagentur Niedersachsen (2019): Entwicklung der installierten PV-Leistung in Niedersachsen 2006-18; https://www.klimaschutz-niedersachsen.de/aktuelles-1/entwicklung-derinstallierten-pv-leistung-in-niedersachsen-2006-2018.html

KWS (2015): Grundlagen des Maisanbaus, Fachberatung Mais https://mediamaster.kws.com/01_Produkte/Mais/grundlagen_des_maisanbaus.pdf

Laber, H. und Lattauschke, G. (Hrsg.) (2014): Gemüsebau, Ulmer Verlag, Stuttgart,

Landesamt für Statistik Niedersachsen (2019) (a): Agrarstrukturerhebung (ASE) 2016, Statistische Berichte Niedersachsen, Heft 3, LSN Hannover

Landesamt für Statistik Niedersachsen (2019)(b): Betriebe, Anbauflächen, Erträge und Erntemengen von Kulturheidebeeren 2016 nach Kreisen, LSN Hannover

Landesamt für Statistik Niedersachsen (2019) (c): Betriebe, Anbauflächen, Erträge und Erntemengen von Spargel 2016 nach Kreisen, LSN Hannover

Landesamt für Statistik Niedersachsen (2019) (d): Betriebe, Anbauflächen, Erträge und Erntemengen von Erdbeeren 2016 nach Kreisen, LSN Hannover

Landesamt für Statistik Niedersachsen (2018): Bodenflächen in Niedersachsen nach Art der tatsächlichen Nutzung 2016, Statistische Berichte Niedersachsen, LSN Hannover

Landesbetrieb für Statistik und Kommunikationstechnologie Niedersachsen (2011): Statistische Monatshefte Niedersachsen, 9/2011, Landwirtschaftliche Unternehmen oder bäuerliche Betriebe?; Hannover

Landesentwicklung und Agrarförderung Niedersachsen (2020): LEA-Portal; https://sla.niedersachsen.de/landentwicklung/LEA/

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2020): Greeningprämie; https://www.landwirtschaftskammer.de/foerderung/direktzahlungen/greeningpraemie.htm#anbaud iversifizierung; Abruf 17.02.2020

Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen (2015): Tabellen Fruchtfolge; https://www.landwirtschaftskammer.de/Landwirtschaft/ackerbau/fruchtfolge/index.htm

Guddat, C., Degner, J., Marschall, K., Zorn, W. und Götz, R. (2015): Leitlinien zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Winterweizen, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, Jena

Lichner, C. (2017): Photovoltaik auf schmalem Fuß, pv-magazine, Ausgabe September 2017, https://www.pv-magazine.de/2017/09/27/photovoltaik-auf-schmalem-fuss/

Luhmann, H.J., Fischedick, M. und Schindele, S. (2014): Stellungsnahmen zur BMWi-Konsultation, Eckpunkte für eine Auschreinbungsdesign für Photpvoltaik-Freiflächen, Wuppertal Institut und Fraunhofer ISE

Lütke Entrup, N. und Schäfer, B.C. (Hrsg.) (2011): Lehrbuch des Pflanzenbaues, Band 2: Kulturpflanzen, 3. Auflage, AgroConcept, Bonn

Neumann, H. (2020): Großes Interesse an Freiflächenanlagen, in topagrar-online, Abruf 25.01.2020, http://www.topagrar.com/energie/news/grosses-interesse-an-freiflaechenanlagen.htm

Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz (2014): Photovoltaik; https://www.umwelt.niedersachsen.de/startseite/themen/energie/erneuerbare_energien/rechtsgrundlagen/landesraumordnungsprogramm/photovoltaik-121328.html, Abruf 23.1.2020

Niepelt, R., Stratmann, M. und Gewohn, T. (2019): INSIDE: Integration von Solarenergie in die Niedersächsische Energielandschaft, Institut für Solarenergieforschung GmbH, Vortrag auf dem 1. Beiratstreffen zum INSIDE-Projekt Hannover, 17.05.2019

Reynolds, P.E., Simpson, J.A., Thevathasan, N.V. und Gordon, A.M. (2007): Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada, Ecological Engineering 29 (4), page 362-371

Rollet, C. (2019): France's Ombrea develops solar blinds with sliding PV panels, pv-magazine, https://www.pv-magazine.com/2019/12/05/french-start-up-ombrea-develops-solar-blinds-made-of-sliding-pv-panels/

Spargel&Erdbeerprofi(2017): Beerenfrüchte – Entwicklungen im geschützten Anbau; https://www.spargel-erdbeerprofi.de/nachricht-spargelerdbeer/detail/beerenfruechte/

Schulz, Vanessa und Weisenburger, Sebastian (2016): Auswirkungen von Beschattung durch Agrofrost auf landwirtschaftliche Kulturen

https://www.researchgate.net/publication/330015714_Auswirkungen_von_Beschattung_durch_Agr ofrost_auf_landwirtschaftliche_Kulturen

Solarbranche.de (2019) (a): Photovoltaik Markt in Deutschland, https://www.solarbranche.de/ausbau/bundeslaender-photovoltaik/niedersachsen?jahr=2019). Abruf 20.1.2020

Solarbranche (2019) (b): Baubeginn der –Photovoltaik-Anlage in Donaueschingen-Aasen, https://www.solarbranche.de/news/presse/pm-6456-baubeginn-der-agri-photovoltaikanlage-in-donaueschingen-aasen, Abruf 10.12. 2019

Solarbranche (2019) (c): Warum Bayern bei den Photovoltaik-Ausschreibungen abräumt; https://www.solarbranche.de/news/nachrichten/artikel-36372-warum-bayern-bei-den-photovoltaik-ausschreibungen-abrumt, Abruf. 20.1.20120

Thomas, Frank (2010): Grundzüge der Pflanzenökologie, Springer Verlag

Trommsdorf, M. (2018): Agrophotovoltaik: Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung (APV-RESOLA), Vortrag Niedersächsische Solartage, 2018, Fraunhofer ISE, Freiburg

University of Massachusetts Amherst, Clean Energy Extension (2019): Dual-use: Agriculture and Solar Photovoltaics, Fact sheet; https://ag.umass.edu/sites/ag.umass.edu/files/fact-sheets/pdf/dual-use_012419.pdf

University of Massachusetts Amherst, Clean Energy Extension (2019): Dual-use: Agriculture and Solar Photovoltaics, Fact sheet; https://ag.umass.edu/sites/ag.umass.edu/files/fact-sheets/pdf/dual-use_012419.pdf

Wirth, H., (2020): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland, Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg, Ausgabe vom 7.1.2020 https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/studies/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.pdf

Weiler, E. und Nover, L. (2008): Allgemeine und molekulare Botanik, Thieme Verlag

Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S, und Högy, P. (2019): Agrophotovoltaics systems: applications, challenges, and opportunities. A review, Agronomy for sustainable development 39:35, Springer Verlag; https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3

Wurr ,D.C.E., Hole, C.C., Fellows, J.R., Milling J., Lynn J.R., O'Brien P.J. (1997): The effect of some environmental factors on potato tuber numbers. Potato Research 40, 297-306.



JURISTISCHES KURZGUTACHTEN

Bedingungen für Freiflächen-Photovoltaik in Niedersachsen nach Erneuerbare-Energien- und Raumordnungsrecht

im Rahmen des

Forschungsprojekts INSIDE

im Auftrag von

Institut für Solarenergieforschung GmbH (ISFH) und Institut für Umweltplanung, Leibniz Universität Hamover

erstellt durch

Dr. Fabio Longo, Rechtsanwalt, Fachanwalt für Verwatungsrecht

A. Vorbemerkung

Das juristische Kurzgutachten untersucht kursorischdie erneuerbare-energien- und raumordnungsrechtlichen Spielräume zur Öffnung von Flächen für die Freiflächen-Photovoltaik. Kapitel B. (Erneuerbare-Energien-Recht) zeigt auf, welche Freiflächen mit EEG-Vergütung für Photovoltaik belegt werden können Kapitel C. (Raumordnungsrecht) gibt Hinweise, welche Gestaltungsmöglichkeiten der Landes- und Regionalplanung zur Bereitstellung geeigneter Flächen zur Verfügung stehen.

Ein Entwurf des Kurzgutachtens ist im Rahmen des Faschungsprojekts INSIDE vor einer Projekt- und Beiratssitzung am 14./15. November 2019 vorgelegt und unter Einbeziehung des fachlichen Austauschs überarbeitet worden. Hieraus gewonnene Erkenntnisse konnten schon in eine Stellungnahme des Konsatiums im Beteiligungsverfahren zur Änderung des niedersächsischen Landes-Raumordnungsprogramms (LROP) im Dezember 2019 eingebracht werden; hieran knüpft die Überarbeitung an.

Dieses Kurzgutachten wurde für die vorgenannten Auftraggeber im Rahmen des Forschungsprojekts INSIDE auf der Grundlage der Vereirbarung zwischen Auftraggeber und Auftragnehmer erstellt. Es ist ausschließlich für den eigenen Gebrauch des Auftraggebers bestimmt. Das Gutachten darf im Rahmen der für das Projekt vorgesehenen Bekanntmachungen in Abstimmung mit KLN veröffertlicht werden. Gegenüber Dritten, die den Inhalt dieses Gutachten ganz oder in Teilen zur Grundlage eigener Entscheidungen machen, übernehmen wir keine Verantwortung oder Haftung.

Karpenstein Longo Nübel Rechtsanwälte Partnerschaft mbB

Hauptstraße 27a · 35435 Wettenberg Fon/Fax +49 641 98 45 71-87/-82 longo@kln-anwaelte.de www.kln-anwaelte.de

10. März 2020 1 von 16



B. Wirtschaftliche Randbedingungen für Freiflächen-Photovoltaik nach Erneuerbare-Energien-Recht

Die Freiflächen-Photovoltaik hat sich zu einer kostengünstigen Form der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien entwickelt. Diesen Kostenvorteil kann sie allerdings nur unter besonders günstigen Randbedingungen als Preisvorteil auf dem Strommarkt verwirklichen, weil das derzeitige Strommarktdesigndie Eigenversorgung mit und die Vermarktung von Solarstrom mit Umlagen, Entgelten und Steuern belastet. Deshalb wird hier nur kurz auf die wirtschaftlichen Optionen für Freiflächen-Photovoltaik außerhalb des EEG eingegangen (I.), bevor die zur Verfügung stehenden Flächen für den Zubau von Freiflächen-Photovoltaik nach dem aktuellen EEG 2017 beleuchtet werden (II.).

Freiflächen-Photovoltaik außerhalb des EEG

1. Eigenversorgung

Die Eigenversorgung ist eine sinnvolle, räumlich alerdings eher begrenzte Möglichkeit, Freiflächen-Photovoltaik für Unternehmen wirtschaftlich einzusetzen. Voraussetzungen sind u. a. nach § 3 Nr. 19 EEG 2017:

- Personenidentität zwischen dem Betreiber einer Freflächen-Photovoltaik und dem Stromverbraucher (z.B. gleiches Unternehmen ist Solarbetreiber und Stromverbraucher; herstellbar auch durch Pachtmodele),
- unmittelbarer räumlicher Zusammenhang zwischen der Freiflächen-Photovoltaik und dem stromverbrauchenden Unternehmen,
- keine Durchleitung des Stroms durch ein Stromnetz, sondern per Direktleitung.

Wenn diese Voraussetzungen gegeben sind, fällt statt 100 % EEG-Umlage bei einer sonstigen Direktvermarktung (siehe unten 2.) nur en Anteil von 40 % an. Da 100 % EEG-Umlage rund 20 % des Strompreises ausmacht, wird der Preisvorteil des 40 %-Anteils bei der Eigenversorgung deutlich, obgleich essystemwidrig ist, dass überhaupt eine Verteuerung des Solarstroms erfolgt, wenn der Strom nicht einmal durch das Stromnetz durchgeleitet wird.

Hinweise zur Handhabung der Eigenversorgung bietet der Leitfaden der Bundesnetzagentur (BNetzA) vom Juli 2016 sowie ein für das 1. Quartal 2020 angekündigtes Hinweispapier zum Messen und Schätzen bei EEG-Umlagepflichten (Quellen finden sich im Internet unter: www.bundesnetzagentur.de > Elektrizität und Gas > Erneuerbare Energien/Kraft-Wärme-Kopplung > EEG-Aufsicht > Eigenversorgung).

Zwischenfazit für die Landes- und Regionalplanung:

Zur Erweiterung der für Photovoltaik verfügbaren Fæiflächen sollten raumordnerische Rahmenbedingungen für die Flächenausweisungen unmittelbar angrenzend an bestehende Gewerbe- und Industriegebiete geschaffen werden. Hierbei ist zu beachten, dass der unmittelbare räumliche Zusammenhang von der Bundesnetzagentur sehr streng verstanden wird, weshalb schon eine überörtiche Straße zwischen Photovoltaikanlage und Unternehmen zum Ausschlusskriterium fürdie Reduzierung der EEG-Umlage werden kann. Auf den Gewerbe- und Industriegebieten selbst ist Freiflächen-Photovoltaik ohnehin zulässig (∞ II.2.a.bb.).

10. März 2020 2 von 16



2. Stromlieferverträge

Die höchstrichterliche Rechtsprechung des Bundesgeichtshofs (BGH) bezieht seit 2009 alle Stromlieferungen zwischen Energieversorger undeinem anderen Unternehmen voll in den Ausgleichsmechanismus des EEG ein (§ 60Abs. 1 S. 1 EEG 2017). Typischer Fall solcher Stromlieferverträge zwischen dem Solatanlagenbetreiber (Energieversorger) und einem anderen Unternehmen (Abnehmer) sinddie sog. Power-Purchase-Agreements (PPA), die es wegen der Vertragsfreiheit in verschiedenen Gestaltungsformen gibt. Nach aktueller Rechtslage handelt es sichbei der Vermarktung des Stroms aus erneuerbaren Energien in der Form der PPA um eine "sonstige Direktvermarktung", also ohne Inanspruchnahme einer Vergütung nach EEG (§ 21a EEG 2017).

Wegen der zu 100 % auf den Strompreis bei PPAs anfallenden EEG-Umlage (= 20 % des Strompreises) sind Freiflächen-Photovoltaik-Projekte außerhalb der EEG-Förderung nur unter besonders günstigen Randbedingungenwirtschaftlich:

- Größe der Freiflächen-Photovoltaikanlage,
- geringe Pacht oder Grundstückskosten (in Niedersachsen problematisch),
- hohe Globalstrahlung der Solarenergie (in Niedersachsen problematisch),
- günstige Topografie,
- geringe Länge der Netzanschlussleitung,
- Aufnahmekapazität des Netzes ohne hohe Netzausbauirvestitionen.

Mindestens zwei der genannten Kriterien sind in Niedersachsen problematisch, weshalb – anders als z.B. in Brandenburg und Sachsen-Anhalt – derzeit kaum Investitionsabsichten in Niedersachsen erkennbar sind. Dies kam sich allerdings mit einem weiteren Preisverfall bei Photovoltaikprojekten und beieiner Reform des regulatorischen Rahmens ändern.

Zwischenfazit für die Landes- und Regionalplanung:

Die regulatorischen Rahmenbedingungen des Energierechts erschweren Investitionen außerhalb des EEG-Rahmens erheblich. In Niedersachen liegen im deutschlandweiten Vergleich auch keine günstigen tatsächlichen Randbedingungen für Freiflächen-Photovoltaik ohne Förderung vor. Da allerdings zu erwarten ist, dass die Photovoltaik-Komponenten in den nächsten Jahren noch günstiger werden, können Anwendungsfälle für PPA-Projekte ohne Vergütung nach EEG auch in Niedesachsen häufiger werden. Deshalb ist es zweckmäßig, die Flächenausweisungen durch die Landes- und Regionalplanung nicht nur auf Flächen zu beschränken, die unter die Flächenkategorien des EEG 2017 fallen. Zur Schaffung guter Voraussetzungen für den dezentralen Ausbau der Freiflächen-Photovoltaik ist es zweckmäßig, schwerpunktmäßig Flächen auszuweisen, die den Flächenkategorien des EEG entsprechen (hierzu I.). Idealerweise werden Flächen ausgewiesen, die sowohl mit als auch ohne EEG-Förderung funktionieren.

10. März 2020 3 von 16



II. Flächen für Freiflächen-Photovoltaik nach EEG 2017

Nach EEG 2017 bekommen Solarfreiflächenanlagen (Solaranlagen) nur dann eine Förderung, wenn sie eine bestimmte Flächenkategorie efüllen. Zu unterscheiden ist hier zwischen Flächenkategorien, die einen Bebauungsplanvoraussetzen, und Flächenkategorien, bei denen kein Bebauungsplan vorliegen muss

Zur Förderung der folgenden Flächenkategorien ist gundsätzlich zu sagen, dass auf allen Flächenkategorien bis zu einer Anlagengröße von 750 kWp installierten Leistung eine feste Einspeisevergütung nach den Regeln der æförderten Direktvermarktung (Marktprämie) möglich ist. Oberhalb dieser installierten Leistung bis maximal 10 MWp ist die Einspeisevergütung durch Teilnahme an Ausschreibungen zu erbieten.

Ausnahmsweise sind auf folgenden Flächenkategorienimmer Ausschreibungen durchzuführen, um eine Vergütung zu erhalten (auch bei kleinen Solaranlagen bis 750 kWp), weil diese Flächenkategorien nicht in § 48 EEG 2017 aufgeführt sind:

- Fläche ohne Bebauungsplan im Eigentum des Bundes oder der BImA (siehe unten 1.c.)
- Bebauungsplan in benachteiligten Gebieten im Acker-oder Grünland (siehe unten 2.b.dd.)

Für eine sichere EEG-Vergütung sind im Einzelfall zahlreiche Sonderregelungen zu beachten, die nicht Gegenstand eines Kurzgutachtens sein können. Es ist deshalb in jedem Solarfreiflächenprojekt ratsam, einen hierauf spezialisierten Rechtsanwalt einzuschalten.

1. Flächenkategorien ohne Bebauungsplan

Für die folgenden Flächenkategorien muss aus Gründen der EEG-Förderung kein Bebauungsplan bestehen oder entwickelt werden, ggf. muss aber aus bauplanungsrechtlichen Gründen zur Schaffung von Baurecht ein B-Plan erlassen werden. Dies ist mit den zuständigen Bauaufsichtsbehörden vorab zu bespiechen.

a) Sonstige bauliche Anlage

Eine Flächenkategorie, die nach EEG 2017 auch ohne Bebauungsplan eine Förderung eröffnet, ist die Solaranlage "auf einer sonstigenbaulichen Anlage, die zu einem anderen Zweck als der Erzeugung von Strom aus solarer \text{3rahlungsenergie errichtet worden ist" (\text{§§ 48 Abs. 1 Nr. 1, 37 Abs. 1 Nr. 2 EEG 2017) Sonstige bauliche Anlagen liegen insbesondere dann vor, wenn die Fläche nicht ursprüngliche Landschaft ist, sondern sich auf der Fläche ein Objekt befindet, das als "bauliche Anlage" nach niedersächsischem Bauordnungsrecht einzustufen ist, z. B. eine Aufschüttung wie etwa eine Erdaushubdeponie oder eine bergbauliche Abraumhalde (\text{§ 2Abs. 1 Niedersächsische Bauordnung – NBauO). Weitere Voraussetzung ist, dass dese bauliche Anlage nicht für den Zweck der Solarenergie errichtet worden ist.

Es muss dann auch klar sein, dass die Solaranlage rur auf der baulichen Anlage förderfähig ist und nicht etwa auch noch auf angrenzenden Flächen. Wenn sich z. B. auf einer Fläche mehrere Aufschüttungen befinden, die nicht drekt aneinandergrenzen, kommt nur die Flächenkategorie der Konversionsfläche in Betracht. Hier können z.B. mehrere

10. März 2020 4 von 16



Mieten einer Erdaushubdeponie, die nicht direkt aneinandergrenzen, aber in einem zusammenhängenden Gebiet liegen, zu einer förderfähigen Fläche zusammengefasst werden (siehe näher unten 2.b.cc.).

b) Planfestgestellte Fläche für Vorhaben von überörtlicher Bedeutung nach § 38 Abs. 1 BauGB

Diese Flächenkategorie betrifft z. B. überörtliche Straßenbauvorhaben oder nach BIm-SchG genehmigte Abfallbeseitigungsanlagen, für die ein Planfeststellungsverfahren oder ein Verfahren mit den Rechtswirkungen der Planfeststellung nach § 38 Abs. 1 BauGB durchgeführt worden ist (§§ 48 Abs. 1 Nr. 2,37 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. f EEG 2017). Ein Bebauungsplan ist dann nicht erforderlich.

Es muss bei dieser Flächenkategorie genau untersucht und mit den zuständigen Behörden abgestimmt werden, ob die oben genannten Verfahrensart vorliegt.

c) Fläche im Eigentum des Bundes oder der BImA

Kein Bebauungsplan ist auf Flächen erforderlich, die im Eigentum des Bundes oder der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben standen oder stehen und nach dem 31. Dezember 2013 von der Bundesanstalt für Immobilienaufgaben verwaltet und für die Entwicklung von Solaranlagen auf ihrer Internetseite veröfentlicht worden sind (§ 37 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. g EEG 2017). Diese Flächen können ausschließlich im Wege der Ausschreibungen für Solaranlagen eine Förderung erhalten; eine Förderung im Wege der Einspeisevergütung oder Marktprämie für Anlagen biszu 750 kWp ist ausgeschlossen, da diese Flächenkategorie nicht in § 48 EEG 2017 aufgeführt ist.

Internet-Veröffentlichung der von der BImA verwalteten Flächen für die Entwicklung von Solaranlagen:

https://erneuerbare-energien.bundesimmobilien.de/150376/suche-nach-potentialflaechen

Ansprechpartner der BImA für Niedersachsen finden sich hier: https://erneuerbare-energien.bundesimmobilien.de/121121/kontakte-und-ansprechpartner

2. Flächenkategorien mit Bebauungsplan

Es gibt Flächenkategorien, bei denen muss schon einmindestens beschlossener Bebauungsplan bestanden haben (a), und es gibt Kategorien, bei den muss der beschlossene Bebauungsplan zum Zweck der Solarnutzung nachdem 1. September 2003 aufgestellt oder geändert werden oder geändert wordensein (b).

a) Bestehende beschlossene B-Pläne

aa) Fläche in bereits vor dem 1. September 2003 beschlossenen B-Plan

Die Fläche muss sich im Bereich eines beschlossenen Bebauungsplans nach § 30 des Baugesetzbuchs befinden, der vor dem 1. September 2003 aufgestellt und später nicht mit dem Zweck geändert worden ist, eine Solaranlagezu errichten (§ 37 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. d, 48 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. a EEG 2017).

Es kommen hier auch alte B-Pläne aus Zeiten vor dem 1. September 2003 in Betracht, die nicht als Satzung beschlossen worden sind (unddamit noch nicht geltendes Recht sind). Der betreffende B-Plan muss nur von der Gemeinde beschlossen worden sein.

10. März 2020 5 von 16



Die Rechtsfrage, wann ein "beschlossener Bebauungsdan" vorliegt, "der vor dem 1. September 2003 aufgestellt und später nicht mitdem Zweck geändert worden ist, eine Solaranlage zu errichten" ist kompliziert undsollte im jeweiligen Einzelfall unter Einschaltung eines Fachanwalts erörtert werden.

bb) Beschlossenes Gewerbe- oder Industriegebiet vor dem 1. Januar 2010

Die Fläche muss sich im Bereich eines beschlossenen Bebauungsplans im Sinne des § 30 BauGB befinden, der vor dem 1. Januar 2010 als Gewerbe- oder Industriegebiet im Sinne des § 8 oder § 9 der Baunutzungsverordnung (BauNVO) ausgewiesen worden ist. Die Fläche ist auch dann förderfähig, wenn der B-Plan nach dem 1. Januar 2010 zumindest auch mit dem Zweck geändert worden ist, eine Solaranlage zu errichten (§§ 37 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. e, 48 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. b \pm G 2017).

Es muss auch bei alten Gewerbe- und Industriegebieten kein B-Plan als Satzung in Kraft getreten sein; der Satzungsbeschluss des Ratsreicht aus. Auch diesbezüglich ist die Erfüllung der rechtlichen Anforderungen anwaltlich abzuklären, um die EEG-Förderung nicht zu gefährden. Wenn Festsetzungen des B-Plans der Solarnutzung entgegenstehen, sollte eine Änderung zusammen mit einem erfahrenen Planungsbüro erwogen werden, um eine optimale Solarnutzung zu ermöglichen.

In der Projektentwicklung sind in Bezug auf diese Flächenkategorie alte Gewerbe- und Industriegebiete, insbesondere in strukturschwachen Gemeinden, in den Blick zu nehmen. Oftmals sind beschlossene Gewerbe- und Industriegebiete in der Landschaft nicht zu erkennen, weil sie wegen fehlender Interessenten oder Unwirtschaftlichkeit der Erschließung noch nicht entwickelt sind. Es ist deshalb lohnenswert, in den Gemeindeverwaltungen (Bauamt) ausdrücklich auch nach nichtfertig entwickelten Gewerbe- und Industriegebieten zu fragen. Eine erste Voreinschätzung kann man den Regionalen Raumordnungsprogrammen entnehmen, weil überwiegendnur darin ausgewiesene Flächen für Gewerbe und Industrie für den Beschlussentsprechender B-Pläne in Betracht kommen.

b) Solar-B-Pläne

Für diese Flächenkategorien gilt, dass eine EEG-Förderung nur dann möglich ist, wenn vor der Errichtung eines Solarparks ein B-Plan im Snne des § 30 BauGB mit dem Zweck geändert oder beschlossen worden ist, eine Solaranbage zu errichten. Der (neue) Solar-B-Plan muss nach dem 1. September 2003 geändert oder aufgestellt worden sein.

Konkret ist bei den Flächenkategorien mit Solar-B-Plan die Ausweisung eines Sondergebiets Photovoltaik-Freiflächenanlage (SO Photovoltaik) nach § 11 Abs. 2 Baunutzungsverordnung (BauNVO) erforderlich. Bei der Erstellung von Bebauungsplänen sind EEG-rechtlich und bauplanungsrechtlich zahlreiche Anforderungen zu beachten, weshalb in Abstimmung mit dem Bauamt der Gemeinde / Stadt die Einschaltung eines Planungsbüros sowie eine begleitende Rechtsberatungzur Sicherung der EEG-Förderung zu empfehlen ist (Ziel: Hinterlegung einer gutachterlichen Stellungnahme eines Rechtsanwalts beim jeweiligen Verteilnetzbetreiber, um eine höhere Rechtssicherheit für den Erhalt und die dauerhafte Sicherung der EEG-Förderung zu schaffen).

10. März 2020 6 von 16



aa) Belbauumosplan längs von Autobahnen oder Schiemenwegen

Die für die Solaranlage vorgesehenen Flächen müssenzum Zeitpunkt des Beschlusses über die Aufstellung oder Änderung des B-Plans längs von Autobahnen oder Schienenwegen liegen; förderfähig sind dabei nur Solaranlagen, die in einer Entfernung bis zu 110 Meter, gemessen vom äußeren Rand der befestigten Fahrbahn, errichtet werden (§§ 37 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. c, 48 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. c Doppelbuchst. aa EEG 2017).

bb) Belbauumosplam für versiegelte Flächen

Zum Zeitpunkt des Beschlusses über die Aufstellung oder Änderung des B-Plans muss die Fläche bereits versiegelt gewesen sein (§§ 37 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. a, 48 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. c Doppelbuchst. bb EEG 2017).

Die Versiegelung muss vollflächig ohne Lücken bestehen. Wenn Lücken bestehen handelt es sich eher um eine Konversionsfläche (siehedazu unten cc)). Was genau unter Versiegelung zu verstehen ist, ist eine Rechtsfrage, die abschließend nur im Einzelfall beantwortet werden kann.

cc) Bebauumasolam für Konversionsflächen

Zum Zeitpunkt des Beschlusses über die Aufstellungoder Änderung des B-Plans muss es sich bei dieser Flächenkategorie um eine Konversionsfläche aus wirtschaftlicher, verkehrlicher, wohnungsbaulicher oder militärischer Nutzung handeln (§§ 37 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. b, 48 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. c Doppelbuchst.cc EEG 2017). Die Solarnutzung muss sich an die bereits aufgegebene (wirtschaftliche, militärische etc.) Vornutzung anschließen; eine gewisse Zwischennutzung steht der EG-Förderung nicht unbedingt entgegen.

Beispiele für militärische Konversionsflächen sind Munitionsdepots, Truppenübungsplätze, Treibstofflager.

Beispiele für wirtschaftliche Konversionsflächen sind Deponieareale, Tagebaue (z.B. für den Abbau von Sand und Kies).

Allgemein ist zu sagen, dass Konversionsflächen zumehr als 50% in ihrem ökologischen Wert beeinträchtigt sein müssen. Manchmal reicht zu dieser Feststellung eine alleinige anwaltliche Einschätzung auf der Basis von Dokumenten, Augenscheinnahme der Fläche und Zeugenbefragungen (z.B. Deponiebetraber, Bergbaubetreiber, Mitarbeiter). In anderen Fällen ist ein Bodengutachten erforderlich. Dies kann nur im Einzelfall beurteilt und weitere Schritte veranlasst werden.

Die Fläche ist nur förderfähig, wenn sie sich nichtin einem Naturschutzgebiet oder einem Nationalpark befindet.

Konversionsprojekte sind oftmals aufwändig zu realisieren, können allerdings wegen ihrer Größe oft auch wirtschaftlich attraktiv sein.

10. März 2020 7 von 16



dd) Bebauungsplan in benachteiligten Gebieten im Acker-oder Grünland

Zum Zeitpunkt des Beschlusses über die Aufstellungoder Änderung des B-Plans muss es sich bei den als Ackerland oder als Grünland gerutzten Flurstücken um benachteiligte Gebiete handeln. Benachteiligte Gebiete betreffen eine nach EU-Recht feststehende Flächenkulisse¹ im Acker- oder Grünland. Im Übrigen darf keine andere der vorgenannten Flächenkategorien einschlägig sein (§ 37 Abs. 1 Nr. 3 Buchst. a EEG 2017).

Darüber hinaus verlangt § 37c EEG 2017, dass Solaranlagen auf benachteiligten Flächen im Ackerland oder im Grünland nur eine Förderung erhalten dürfen, wenn das jeweilige Bundesland diese Flächen freigegeben hat. Nedersachsen hat sich bislang nicht für eine solche Verordnung entschieden; anders z. B. Hessen durch die Verordnung über Gebote für Freiflächensolaranlagen (Freiflächensolaranlagenverordnung – FSV) vom 19. November 2018 getan (Gesetz- und Veroidnungsblatt für das Land Hessen vom 30. November 2018, S. 678). § 1 Abs. 1 FSVregelt für Hessen, dass Freiflächensolaranlagen auf benachteiligten Gebieten im Ackerland oder im Grünland im Sinne des § 37 Abs. 1 Nr. 3 Buchstabe h und i EEG 2017 eine EEG-Förderung nach erfolgreicher Teilnahme an Ausschreibungen erhalten können; die Acker- und Grünlandflächen müssen für eine Förderfähigkeit zwingend außerhalbvon Natura-2000-Gebieten (FFH-Gebiete) liegen. Wichtig ist dabei, dass eine Bezuschlagung eines Gebots in einer Ausschreibung nur erfolgen darf, wenn nicht erstmals de Grenze von 35 Megawatt zu installierender Leistung für bezuschlagte Gebote pro Kalenderjahr erreicht oder überschritten worden ist. Um das Risiko einer Nichtbezuschlagung einschätzen zu können, sollte daher vor der Teilnahme an der Ausschreibungbei der Bundesnetzagentur (BNetzA) abgefragt werden, ob der 35-MW-Rahmen schon ausgeschöpft ist.

Da es in Niedersachsen derzeit keine Freiflächen-Photovoltaik-Verordnung gibt, kommt diese Flächenkategorie derzeit nicht zum Zuge Sollte Niedersachsen eine solche Verordnung auf den Weg bringen gilt Folgendes:

Unter den Begriff des "benachteiligten Gebiets" falen solche Gebiete, in denen die Aufgabe der Landnutzung droht und der ländliche Lebensraum erhalten werden muss. Dieser aus dem EU-Landwirtschaftsrecht stammende Begriff hatte ursprünglich bei Ausgleichszahlungen eine Bedeutung, weshalb in diesen Gebieten mehrere Nachteile nebeneinander (kumulativ) vorliegen müssen:

- Schwach ertragsfähige landwirtschaftliche Flächen
- Deutlich unterdurchschnittliche Produktionsergebnisse als Folge geringer natürlicher Ertragsfähigkeit und
- eine geringe bzw. abnehmende Bevölkerungsdichte, wæbei die Bevölkerung überwiegend auf die Landwirtschaft angewiesen ist.
- Zwingende Voraussetzung für das Vorliegen einer Fläche ist, dass die Fläche im Gemeinschaftsverzeichnis der EU-Kommission genanntist (siehe Fußnote 1).

10. März 2020 8 von 16

_

¹ Richtlinie 86/465/EWG des Rates vom 14. Juli 1986betreffend das Gemeinschaftsverzeichnis der benachteiligten landwirtschaftlichen Gebiete iS.d. Richtlinie 75/268/EWG (ABI. (EG) Nr. L 273, S. 1) in der Fassung der Entscheidung der EU-Kommission 97/172/EG vom 10. Februar 1997 (ABI. (EG) Nr. L 72, S. 1).



III. Zwischenfazit für die Landes- und Regionalplanung

Die nach dem EEG 2017 förderfähigen Flächenkategorien sollten schwerpunktmäßig in der Landes- und Regionalplanung für Freiflächen-Photovoltaik vorgesehen werden (1.). Optimal sind Ausweisungen von Flächen in Gebieten, auf denen sowohl nach dem EEG 2017 als auch perspektivisch im Rahmen der Direktvermarktung und Eigenversorgung bzw. in den Varianten der Agro-PV Freiflächen-Photovoltaik verwirklicht werden kann (2.).

- 1. Flächenkategorien nach dem EEG 2017, die sich vom Solarpotenzial für die Ausweisung in der Landes- und Regionalplanung eignen:
- a) Alle Vermarktungsoptionen (EEG-Vergütung bis 750kWp, Teilnahme an Ausschreibungen und Direktvermarktung) und Eigenversorgung sind grundsätzlich möglich:
- aa) B-Plan erforderlich:
 - Flächen längs von Autobahnen oder Schienenwegen (∞II.2.b.aa.)
 - Konversionsflächen (∞ II.2.b.cc.)
 - Gewerbe- oder Industriegebiet (∞ II.2.a.bb.)
 - Bestehende beschlossene B-Pläne (∞ II.2.a.aa.)

bb) Kein B-Plan erforderlich:

- Sonstige bauliche Anlage (∞ II.1.a.)
- Planfestgestellte Fläche (∞ II.1.b.)
- b) Eingeschränkte Vermarktungsoptionen (keine EEG-Vergütung bis 750 kWp):
- aa) B-Plan und Verordnung nach Landesrecht erforderlich:
 - Benachteiligte Gebiete im Acker- oder Grünland (∞ I.2.b.dd.)

bb) Kein B-Plan erforderlich:

Flächen im Eigentum des Bundes und der BlmA (∞ II.1.c.)

Die Flächenkategorie der versiegelten Flächen (∞ II2.b.bb.) ist als einzige nicht aufgeführt worden, weil die Verfügbarkeit für den Ausbauder Solarenergie vernachlässigbar ist. Es sind zu wenige versiegelte Flächen in ausreichender Größe für die Solarnutzung verfügbar. Im Übrigen stehen auf diesen Flächen zumeist keine planungsrechtlichen Restriktionen der Installation von Freiflächen-Photovoltaik entgegen. Es ist daher nicht zweckmäßig, für den Ausbau der Freiflächen-Photovoltaik in der Landes- und Regionalplanung – wie bislang – auf versiegelte Flächen zusetzen.

- 2. Favorisierte Flächenkategorien (geordnet nach den Vermarktungsmöglichkeiten), die sich vom Solarpotenzial für die Ausweisung in der Landes- und Regionalplanung eignen:
- a) Ertragreiche Flächenkategorie nach EEG 2017, diesich für alle Vermarktungsmöglichkeiten eignet:
 - Flächen längs von Autobahnen oder Schienenwegen (∞II.2.b.aa.)
 - Konversionsflächen (∞ II.2.b.cc.)

10. März 2020 9 von 16



- b) Ertragreiche Flächenkategorie, die sich besonders für die sonstige Direktvermarktung (PPA) bzw. für Agro-PV eignet und im Falle der Einführung einer Freiflächen-PV-Verordnung in Niedersachsen auch für eine EEG-Förderung geöffnet werden kann:
 - Benachteiligte Gebiete im Acker- oder Grünland (∞ I.2.b.dd.)
- c) Ertragreiche Flächenkategorie, die sich besonders für die Eigenversorgung eignet:
 - Gewerbe- oder Industriegebiet (∞ II.2.a.bb.)
- d) Ertragreiche Flächenkategorie, die sich besondes für die Freiflächen-Photovoltaik mit fester EEG-Vergütung (bis zu einer installierten Leistung von 750 kWp):
 - Sonstige bauliche Anlage (∞ II.1.a.)
- e) Flächenkategorie, die sich für alle Vermarktungsmöglichkeiten (ohne feste EEG-Vergütung) eignet:
 - Flächen im Eigentum des Bundes und der BImA (∞ II.1.c.)

C. Raumordmungsrechtliche Randbedingungen für Freiflächen-Photovoltaik in Niedersachsen

Zur Umsetzung des Ziels des Landes Niedersachsen zur Öffnung zusätzlicher Räume für die Freiflächen-Photovoltaik soll nach einer kursorischen Betrachtung der raumordnungsrechtliche Status quo der Landesplanung (I.) sowie Optionen zur Weiterentwicklung im Sinne des Ziels (II.) kurz aufgezeigt und auf Umsetzungsmöglichkeiten in der Regionalplanung (III.) eingegangen werden.

I. Stattus quo der Landesplanung für Freiflächen-Photovoltaik

Das Landesraumordnungsprogramm (LROP) Niedersachsen 2017 (Abschnitt 4.2 Nr. 13) legt Folgendes für raumbedeutsame Solaranlagen fest

¹Für die Nutzung durch Anlagen zur Erzeugung von Strom aus solarer Strahlungsenergie sollen bereits versiegelte Flächen in Anspruch genommen werden. ²Landwirtschaftlich genutzte und nicht bebaute Flächen, für die der raummordmeriische Vorbehalt für die Landwirtschaftlt gilt, dürfen dafür nicht in Anspruch genommen werden. ³Zur Verbesserung der Standortentscheidungen für die in Satz 1 genannten Anlagen sollen die Träger der Regionalplanung im Benehmen mit den Gemeinden regionale Energiekonzepte erstellen und in die Regionalen Raumordnungsprogramme integrieren.

Anmerkung nach Satz 2 LROP:

Fettdruck = Ziele der Raumordnung Im Übrigen = Grundsätze der Raumordnung

Relevante raumordnungsrechtliche Definitionen zu vorstehender Festlegung:

Ziele der Raumordnung sind "verbindliche Vorgaben in Form vonräumlich und sachlich bestimmten oder bestimmbaren, vom Träger der Raumordnung abschließend abgewogenen textlichen oder zeichnerischen Festlegungen in Raumordnungsplänen zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raums" (§ 3Abs. 1 Nr. 2 ROG).

10. März 2020 10 von 16



Grundsätze der Raumordnung sind "Aussagen zur Entwicklung, Ordnung und Sicherung des Raums als Vorgaben für nachfolgende Abwägungs- oder Ermessensentscheidungen; Grundsätze der Raumordnung können durch Geætz oder als Festlegungen in einem Raumordnungsplan aufgestellt werden" (§ 3 Abs 1 Nr. 3 ROG)

Vorbehaltsgebiete sollen "bestimmten raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen vorbehalten bleiben …, denen bei der Abwägung mit konkurrierenden raumbedeutsamen Funktionen oder Nutzungen besonderes Gewicht beizumessen ist" (§ 7 Abs. 3 Nr. 2 ROG).

Vorranggebiete sind Gebiete, "die für bestimmte raumbedeutsame Funktionen oder Nutzungen vorgesehen sind und andere raumbedeutsame Funktionen oder Nutzungen in diesem Gebiet ausschließen, soweit diese mitden vorrangigen Funktionen oder Nutzungen nicht vereinbar sind" (§ 7 Abs. 3 Nr. 1 ROG).

1. Solarausschluss auf landwirtschaftlichen Flächen

Ein großes Hindernis für Freiflächen-Photovoltaik ist die fettgedruckte Zielfestlegung in Abschnitt 4.2 Nr. 13 Satz 2 LROP im Sinne des § 3 Abs. 1 Nr. 2 ROG. Danach schließt die aktuelle Landesplanung Flächen aus, für die inder Regionalplanung (RROP) ein Nutzungsvorbehalt für die Landwirtschaft festgelegtworden ist. Diese Nutzungsvorbehalte für die Landwirtschaft werden in Niedersachsen in der Regel großzügig eingesetzt. Dabei sind Vorbehaltsgebiete Landwirtschaftnach § 7 Abs. 3 Nr. 2 ROG (anders als Vorranggebiete) eigentlich offen für weitere Nutzungen. Diese Zielfestlegung zur Freiflächen-Photovoltaik verengt Vorbehaltsgebiete Landwirtschaft systemwidrig zu Ausschlussgebieten für die Freiflächen-Photovoltaik Diese Ausschlussfunktion ist für Vorranggebiete für Landwirtschaft nach § 7 Abs. 3 Nr. 2 ROG vorgesehen. Die Wirkung der fettgedruckten Zielfestlegung in Abschnitt 4.2Nr. 13 Satz 2 LROP ist für die Freiflächen-Photovoltaik sehr weitreichend und einschränkend. Praktisch im gesamten, der Landwirtschaft vorbehaltenen und vorrangig zur Verfügung stehenden Raum des Landes Niedersachsen ist die Freiflächen-Photovoltaikdamit ausgeschlossen.

2. Verweisung auf unergiebige Flächenkategorie "versiegelte Flächen"

Der raumordnungsrechtliche Grundsatz in Abschnitt 42 Nr. 13 Satz 2 LROP im Sinne des § 3 Abs. 1 Nr. 3 ROG verweist die Freiflächen-Photovoltaik im Übrigen auf eine Flächenkategorie, die kaum Potenzial für die Erzeugungvon Solarstrom bietet: "versiegelte Flächen" (∞ B.II.2.b.bb.). Die Kombination aus Ausschluss einer der größten Flächenkategorien des Landes (Landwirtschaft) und die Ermöglichung auf einer kleinen Flächenkategorie (versiegelte Fläche) führt dazu, dass die Freiflächen-Photovoltaik in Niedersachsen eine Nischenanwendung darstellt und keinen wesentlichen Beitrag für die Energiewende leistet und auch nicht leisten kam.

II. Weiteremtwiicklung der Landesplanung für Freiflächen-Photovoltaik

Um das Ziel des Ausbaus der Freiflächen-Photovoltak für die Energiewende umsetzen zu können, ist eine funktionale Weiterentwicklung der Landesplanung erforderlich. Die Betrachtung der regulatorischen Hemmnisse aus dem Energierecht hat ergeben, dass in der Landes- und Regionalplanung schwerpunktmäßigFlächen in den Blick

10. März 2020 11 von 16



genommen werden sollten, auf denen eine EEG-Förderung realisierbar ist (∞ B.I.). Dabei sollten die Flächen idealerweise so ausgewiesenwerden, dass auf ihnen in Zukunft idealerweise auch ohne EEG-Förderung die Freiflächen-Photovoltaik genutzt werden kann (möglichst große Schnittmenge). Zusätzlich sollten Flächen ermöglicht werden, die sich für die Eigenversorgung von Industrie und Gewerbe mit Solarstrom eignen.

Um Raumnutzungskonflikte zu minimieren, den Interessenausgleich mit anderen Nutzungen zu ermöglichen und die wirtschaftliche Entwicklung in strukturschwachen Regionen zu fördern, ist es zweckmäßig, Flächen auszuweisen, die bereits einer wirtschaftlichen, infrastrukturellen oder militärischen Vornutzung unterliegen (Konversionsflächen: ∞ B.II.2.b.cc.; Flächen längs Verkehrswegen: ∞ B.II.2.b.aa.), sich in der Umgebung von Industrie und Gewerbe befinden (∞ B.I.1. und B.II.2a.bb.) oder sich in einem "benachteiligten Gebiet" nach EU-Recht befinden (∞ B.II.2b.dd.).

Zur Innovations- und Technologieförderung sollten auch ausreichend Flächen vorgesehen werden, die für Agro-PV nutzbar sind; auch hiergilt, möglichst Flächen zu finden, auf denen auch eine EEG-Förderung realisierbar ist. Für den Interessenausgleich mit der Landwirtschaft ist es von Bedeutung, vorrangigertragsschwache Flächen auszuweisen; hierfür besonders geeignet ist die Flächenkategorie der "benachteiligten Gebiete" nach EU-Recht (∞ B.II.2.b.dd.).

Zur Umsetzung der vorgenannten Ziele hat das Konsortium INSIDE empfohlen, die Flächenkulisse für Freiflächen-Photovoltaik in der Lardesplanung zu öffnen und die Nutzung innovativer Technologieoptionen (Agro-PV) zu emöglichen:

1. Den Grundsatz in Abschnitt 4.2 Ziffer 13 Satz 1LROP wie folgt zu ändern:

"Für die Nutzung durch Anlagen zur Erzeugung von Strom aus solarer Strahlungsenergie sollen vorrangig Flächen in Anspruch genommen werden, die einer wirtschaftlichen, infrastrukturellen oder militärischen Vornutzung unterliegen, in unmittelbarer Umgebung von Verkehrsinfrastruktur, Industrie und Gewerbe liegen oder sich in einem benachteiligten Gebiet nach EU-Recht befinden, das als Acker- oder Grünland genutzt wird."

2. Das Ziel in Abschnitt 4.2 Ziffer 13 Satz 2 LROPzu streichen oder durch folgende Zielbestimmung zu ersetzen:

"Landwirtschaftlich genutzte und nicht bebaute Flächen, für die der raumordmerische Vorbehalt für die Landwirtschafft gillt, dürfen für die Erzeugung von Strom aus Solarenergie in Anspruch genommen werden, wenn eine landwirtschaftliche Flächennutzung parallel zur oder im Anschluss an die Solarstromgewinnung weiterhin möglich bleibt."

3. Den Grundsatz in Abschnitt 4.2 Ziffer 13 Satz 3LROP um den angefügten Halbsatz nach dem Semikolon zu ergänzen:

"Zur Verbesserung der Standortentscheidungen für die in Satz 1 genannten Anlagen sollen die Träger der Regionalplanung im Benehmen mit den Gemeinden regionale Energiekonzepte erstellen und in die Regionalen Raumordnungsprogramme integrieren; Vorranggebiete ohne Ausschlusswirkung und Vorbehaltsgebiete sollen auf der Grundlage dieser regionalen Energiekonzepte für Solar-Freiflächenanlagen in einer Größenordnung von 2 Præent der Regionsfläche ausgewiesen werden."

10. März 2020 12 von 16



Danach lautet der konsolidierte Formulierungsvorschlag für Abschnitt 4.2 Ziffer 13 LROP; das Ziel in Satz 2 kann auch entfallen und steht deshalb in Klammern:

"Für die Nutzung durch Anlagen zur Erzeugung von Strom aus solarer Strahlungsenergie sollen vorrangig Flächen in Anspruch ænommen werden, die einer wirtschaftlichen, infrastrukturellen oder militärischen Vornutzung unterliegen, in unmittelbarer Umgebung von Verkehrsinfrastruktur, Industrie und Gewerbe liegen oder sich in einem benachteiligten Gebiet nach EU-Recht befinden, das als Acker- oder Grünland genutzt wird. (Landwirtschaftlich genutzte und nicht bebaute Flächen, für die der raumordnerische Vorbehalt für die Landwirtschaft gilt, dürfen für die Erzeugung von Strom aus Solarenergie in Anspruch genommen werden, wenn eine landwirtschaftliche Flächennutzung parallel zur oder im Anschluss an die Solarstromgewinnung weiterhin möglich bleibt.) Zur Verbesserung der Standortentscheidungen für de in Satz 1 genannten Anlagen sollen die Träger der Regionalplanung im Benehmen mit den Gemeinden regionale Energiekonzepte erstellen und in die Regionalen Raumordnungsprogramme integrieren; Vorranggebiete ohne Ausschlusswirkung und Vorbehaltsgebiete sollen auf der Grundlage dieser regionalen Energiekonzepte für Solar-Freiflächenanlagen in einer Größenordnungvon 2 Prozent der Regionsfläche ausgewiesen werden."

III. Freiflächen-Photovoltaik und Regionalplanung

Den Ausbau der Freiflächen-PV greifen bisher nur wenige regionale Raumordnungsprogramme (RROP) in Niedersachsen auf. Über die Bestimmungen des Landesraumordnungsprogramms (LROP) hinausgehende Festsetzungen finden sich kaum. Lediglich der Landkreis Cuxhaven macht detaillierte Vorgaben: neben geeigneten Flächen im Innen- und Außenbereich sowie nicht raumverträglichen Flächen wird dort ein für Freiflächen-Photovoltaikanlagen vorgesehener Flächenanteil (0,5 % der Gemeindefläche) vorgegeben.

Die unter II. vorgeschlagene Änderung des LROP eröfnet den Trägern der Regionalplanung in Niedersachsen einen größeren Spielraum zur Festlegung von Vorrang- und Vorbehaltsgebieten für Freiflächen-Photovoltaik. Dæei soll nochmals darauf hingewiesen werden, dass eine solche regionalplanerische Ausweisung EEG-rechtlich keine direkte Relevanz für die Förderfähigkeit einer Flächehat; dazu ist auf den meisten Flächen ein Bebauungsplan erforderlich (mit Ausnahmender Flächenkategorien ohne Bebauungsplan: ∞ B.II.1.a.-c.). Eine Ausweisung als Vorranggebiet oder Vorbehaltsgebiet Solar bedeutet lediglich, dass auf diesen Flächen bichter ein Bebauungsplan beschlossen werden kann, z. B. weil keine Abweichung vom Regionalplan erforderlich ist, und der Flächennutzungsplan leichter durch die jeweilige Gemeinde geändert werden kann, falls dies für die Aufstellung oder Änderungeines Bebauungsplans erforderlich ist.

Nach dem Formulierungsvorschlag für den LROP würde der Regionalplanung ein Entscheidungsspielraum für eine starke oder eine etwasschwächere Förderung der Freiflächen-Photovoltaik eröffnet:

Stark wirken Vorranggebiete für Freiflächen-Photovdtaik. Sie legen Gebiete für Photovoltaik fest, die andere raumbedeutsame Funktionen oder Nutzungen in diesem Gebiet ausschließen, soweit diese mit den vorrangigen Funktionen oder Nutzungen nicht

10. März 2020 13 von 16



vereinbar sind (§ 7 Abs. 3 Nr. 1 ROG). Das bedeutet Innerhalb der Vorranggebiete schließen sie andere, mit der Solarnutzung unvereirbare Nutzungen aus (z. B. die Landwirtschaft). Außerhalb der Vorranggebiete entfaten sie keine Ausschlusswirkung, d. h. Freiflächen-Photovoltaik ist im Rahmen des LROP auch außerhalb der Vorranggebiete zulässig.

Schwächer wirken Vorbehaltsgebiete. In diesen ist de Solarenergienutzung von besonderem öffentlichem Interesse; sie ist aber nicht vorangig zu verwirklichen. Eine Gemeinde könnte nämlich auch beschließen, dass im Vorbehaltsgebiet Freiflächen-Photovoltaik eine andere als die Solarnutzung stattfirden soll, wenn sie dies gut begründet. Die Gemeinde könnte auch das Ziel verfolgen, im Vorbehaltsgebiet einen Interessenausgleich zwischen Photovoltaik und Landwirtschaft zu organisieren und beide Nutzungen nebeneinander vorgeben; eine Verwirklichung der Photovoltaik könnte dann nur in den unterschiedlichen Formen der Agro-PV stattfinden. Für die Gemeinde besteht mit dem Instrument des Bebauungsplans auch die Möglichkeit, die Agro-PV städtebaulich zu steuern.

Ein Beispiel für die Festlegung von Vorbehaltsgebieten Solar stellt der Teilregionalplan Energie Mittelhessen (TRPEM) dar (Staatsanzeiger für das Land Hessen, Nr. 51/2017, S. 1483), dessen Festlegungen hier dokumentiert werden:

"Abschnitt 2.3 "Nutzung solarer Strahlungsenergie durch Photovoltaik"

- 2.3-1 (G): Photovoltaik-Freiflächenanlagen sollen wrrangig in Vorranggebieten Industrie und Gewerbeerrichtet werden, soweit für andere gewerbliche Entwicklungen Raum bleibt.
- 2.3-2 (G) (K): Raumbedeutsame Photovoltaik-Freiflächenanlagen, die nicht in Vorranggebieten Industrie und Gewerbe errichtet werden können, sollen in den Vorbehaltsgebieten für Photovoltaik-Freiflächenanlægen errichtet werden. In diesen Vorbehaltsgebieten ist der Nutzung durch raumbedeutsame Photovoltaikanlagen bei der Abwägung mit konkurrierenden raumbedeutsamen Nutzungen ein besonderes Gewicht beizumessen.
- 2.3-3 (Z): Raumbedeutsame Photovoltaik-Freiflächenanlagen in einem Vorbehaltsgebiet für Photovoltaik-Freiflächenanlagen, dæ gleichzeitig Vorranggebiet für Landwirtschaft ist, müssen mit agrarstrukturellen Belangen vereinbar sein.
- 2.3-4 (Z) Die Flächeninanspruchnahme durch Photovotaik-Freiflächenanlagen ist innerhalb der einzelnen Gebietskörperschaft auf 2 % der Fläche der Vorrangund Vorbehaltsgebiete für Landwirtschaft zu begrenzen."

Legende:

- (Z) Ziel der Raumordnung
- (G) Grundsatz
- (K) in Plankarte dargestellt

Die vorstehenden Festlegungen im TRPEM sind spezifisch für die Bedürfnisse der Region Mittelhessen aufgestellt worden. Mittelhessenist mit niedersächsischen Regionen nur eingeschränkt vergleichbar. So hat die Landwirtschaft in Mittelhessen eine geringere Bedeutung im Vergleich zu Niedersachsen. Dennach können die mittelhessischen Regelungen durchaus als beispielhafte Formulierungen in Betracht gezogen werden, auch weil die Vereinbarkeit mit "agrarstrukturellen Belangen" im TRPEM als Zielbestimmung verankert worden ist (2.3-3 (Z)).

10. März 2020 14 von 16



D. Zusammenfassung und Fazit

Allgemeines

- 1. Nach derzeitiger Rechtslage mit regulatorischen Restriktionen für die Vermarktung von Strom aus erneuerbaren Energien ist es fürdas Ziel des Ausbaus der Freiflächen-Photovoltaik von Bedeutung, in der Landes- und Regionalplanung Flächen vorzusehen, auf denen eine EEG-Förderung rælisierbar ist.
- 2. Um auf künftige Verbesserungen für die Vermarktungvon Strom aus Freiflächen-Photovoltaik in einer neuen Energiemarktordnung mittelfristig eingestellt zu sein, sollte die Regionalplanung auch Flächen vαsehen, die günstig sind und nicht notwendigerweise auf das EEG angewiesen sind. Idealerweise werden Flächen ausgewiesen, die sowohl mit als auch ohne EEG funktionieren. Zusätzlich sollten Flächen ermöglicht werden, die sich für die Eigenversorgung von Industrie und Gewerbe mit Solarstrom eignen.
- 3. Um Raumnutzungskonflikte zu minimieren, den Interessenausgleich mit anderen Nutzungen zu ermöglichen und die wirtschaftliche Entwicklung in strukturschwachen Regionen zu fördern, ist es zweckmäßig, Hächen auszuweisen, die bereits einer wirtschaftlichen, infrastrukturellenoder militärischen Vornutzung unterliegen (Konversionsflächen: ∞ B.II.2.b.cc.; Flächen längs Verkehrswegen: ∞ B.II.2.b.aa.) oder sich in einem "benachteiligtenGebiet" nach EU-Recht befinden (∞ B.II.2.b.dd.).
- 4. Zur Innovations- und Technologieförderung sollten auch ausreichend Flächen vorgesehen werden, die für Agro-PV nutzbar sind; auch hier gilt, möglichst Flächen zu finden, auf denen auch eine EEG-Förderung æalisierbar ist. Für den Interessenausgleich mit der Landwirtschaft ist es vonBedeutung, vorrangig ertragsschwache Flächen auszuweisen; hierfür besondes geeignet ist die Flächenkategorie der "benachteiligten Gebiete" nach EURecht (∞ B.II.2.b.dd.).

II. Favorisierte Flächenkategorien für die Raumordhung

Favorisierte Flächenkategorien (geordnet nach den Vermarktungsmöglichkeiten), die sich vom Solarpotenzial für die Ausweisung in der Landes- und Regionalplanung eignen:

- 1. Ertragreiche Flächenkategorie nach EEG 2017, die sich für alle Vermarktungsmöglichkeiten eignet:
 - Flächen längs von Autobahnen oder Schienenwegen (∞B.II.2.b.aa.)
 - Konversionsflächen (∞ B.II.2.b.cc.)
- 2. Ertragreiche Flächenkategorie, die sich besonders für die sonstige Direktvermarktung (PPA) bzw. für Agro-PV eignet und im Falleder Einführung einer Freiflächen-PV-Verordnung in Niedersachsen auch für eine EEG-Förderung geöffnet werden kann:
 - Benachteiligte Gebiete im Acker- oder Grünland (∞ BII.2.b.dd.)

10. März 2020 15 von 16



- 3. Ertragreiche Flächenkategorie, die sich besonders für die Eigenversorgung eignet:
 - Gewerbe- oder Industriegebiet (∞ B.II.2.a.bb.) sowie Flächen unmittelbar angrenzend an solche Gebiete (∞ B.I.1.)
- 4. Ertragreiche Flächenkategorie, die sich besonders für die Freiflächen-Photovoltaik mit fester EEG-Vergütung (bis zu einer installerten Leistung von 750 kWp):
 - Sonstige bauliche Anlage (∞ B.II.1.a.)
- 5. Flächenkategorie, die sich für alle Vermarktungsmöglichkeiten (ohne feste EEG-Vergütung) eignet:
 - Flächen im Eigentum des Bundes und der BlmA (∞ B.II1.c.)

III. Umsetzung in der Landes- und Regionalplanung

Für die Erreichung der Ziele der Energiewende, istes relevant, in der Landesplanung den Ausschluss landwirtschaftlicher Flächen sowie de Fokussierung auf die unergiebige Flächenkategorie "versiegelte Flächen" zu beerden (∞ B.II.2.b.bb.).

Um das Ziel der Öffnung von Flächen für die Freiflächen-Photovoltaik möglichst funktional im Sinne der Energiewende zu verfolgen (∞ D.I), stehen landes- und regionalplanerische Instrumentarien des Raumordnungsrechts beæit (∞ C.). Die dortigen Ausführungen und Formulierungsvorschläge für LROP und RROP berücksichtigen Instrumente zum Schutz landwirtschaftlicher Interessen (∞ C.II, III.).

Es sollten besondere Anreize zur Innovations- und Technologieförderung für Agro-PV gesetzt werden. Hierbei ist ein enger Austausch mitder Interessenvertretung der Landwirtschaft erforderlich, um v. a. solche Technologien der Agro-PV in den Markt zu bringen, die dazu geeignet sind, in der Landwirtschaftauf Akzeptanz zu stoßen.

IV. Flächenkataster

Zur Investitionsförderung ist die Entwicklung eines Flächenkatasters in Niedersachsen zweckmäßig, das wenigstens die in der Landesplanungfavorisierten Flächen (∞ D.II.) darstellt. Im Übrigen sollte auf das raumordnungsræhtliche Gegenstromprinzip gesetzt werden und die Gemeinden in der Regionalplanung nach konkreten Flächen abgefragt werden (unter Vorlage einer Darlegung der Flächenkægorien nach EEG 2017, ∞ B.II. oder ∞ D.II.).

* * * * *

Wettenberg, 10. März 2020

Dr. Fabio Longo Rechtsanwalt

Fachanwalt für Verwaltungsrecht

10. März 2020 16 von 16