

Literaturstudie, 12. November 2021

Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt

Autor

Jürg Schlegel, ZHAW, Forschungsgruppe Umweltplanung (juerg.schlegel@zhaw.ch)

Begleitgruppe (alphabetisch)

Dr. Wieland Hintz, Bundesamt für Energie

Prof. Jürg Rohrer, ZHAW, Leiter Forschungsgruppe Erneuerbare Energien

Prof. Dr. Reto Rupf, ZHAW, Leiter Zentrum Ecosystems & Biodiversity

David Stickelberger, Geschäftsleiter Swissolar

Diese Studie wurde im Auftrag von EnergieSchweiz erstellt.

Für den Inhalt sind alleine die Autoren verantwortlich.

Inhaltsverzeichnis

1.	Ausgangslage	5
1.1	Bedeutung erneuerbarer Energien in der Schweiz.....	5
1.2	Situation der Biodiversität in der Schweiz.....	6
2.	Auftrag und Projektorganisation	7
3.	Methodisches Vorgehen	8
4.	Ergebnisse der Literaturstudie	12
4.1	Allgemeines zu Umweltauswirkungen und Standorteignung von Freiflächen-PVA	12
4.1.1	Allgemeine Umweltauswirkungen.....	12
4.1.2	Standorteignung	13
4.2	Auswirkungen auf die Fauna.....	14
4.2.1	Allgemeine Auswirkungen	14
4.2.2	Säugetiere (ohne Nutztiere)	15
4.2.3	Vögel.....	17
4.2.4	Reptilien und Amphibien	21
4.2.5	Bestäuber-Insekten und Tagfalter	22
4.2.6	Andere Wirbellosen-Gruppen inkl. Mikroorganismen	25
4.3	Auswirkungen auf die Vegetation.....	27
4.4	Auswirkungen auf abiotische Umweltfaktoren.....	29
4.4.1	Bodeneigenschaften und -funktionen	29
4.4.2	Kontamination von Böden und Wasser.....	30
4.4.3	Lufttemperatur und -feuchtigkeit.....	31
4.5	Agro-Photovoltaik (APV)	32
4.5.1	Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion.....	32
4.5.2	Gesellschaftliche Akzeptanz	36
4.5.3	Ökosystemleistungen und Biodiversität	37
4.6	Floating Photovoltaik (FPV).....	37

5.	Synthese	39
5.1	Auswirkungen von Freiflächen-PVA auf Umwelt und Biodiversität	39
5.1.1	Allgemeines	39
5.1.2	Vorteile	39
5.1.3	Nachteile	43
5.2	Agro-Photovoltaik (APV)	47
5.2.1	Vorteile	47
5.2.2	Nachteile	48
5.3	Floating Photovoltaik (FPV).....	51
5.3.1	Vorteile	51
5.3.2	Nachteile	52
5.4	Spezialfall Photovoltaik im alpinen Raum	52
5.5	Spezialfall «Solarstrassen» und «Solarzäune»	55
5.5.1	«Solarstrassen».....	55
5.5.2	«Solarzäune»	56
6.	Forschungsbedarf und Ausblick.....	57
6.1	Forschungsbedarf.....	57
6.2	Ausblick.....	58
7.	Literatur und Referenzen.....	60
8.	Anhang: Voransicht Literaturliste.....	72

1. Ausgangslage

1.1 Bedeutung erneuerbarer Energien in der Schweiz

Mit der Energiestrategie 2050 hat die Schweiz den Atomausstieg, die Steigerung der Energieeffizienz sowie den Ausbau der erneuerbaren Energieproduktion beschlossen. Durch diese von der Stimmbevölkerung bestätigten Neuausrichtung soll die Schweiz nachhaltig und klimafreundlich mit erneuerbarer Energie versorgt und die Abhängigkeit von importierten Energien reduziert werden (BFE, 2018). Die Dekarbonisierungs-Strategie des Energiesystems gemäss dem Abkommen von Paris hat in der Schweiz bis zum Jahr 2050 einen zusätzlichen Bedarf an 45-50 TWh Strom zur Folge (Remund, Albrecht, & Stickelberger, 2019; Rohrer, 2020).

Durch das neue Ziel des Bundesrates, wonach in der Schweiz ab dem Jahr 2050 nicht mehr Treibhausgase ausgestossen werden, als natürliche und technische Speicher aufnehmen können («Netto-Null-Ziel»), muss die Energiestrategie 2050 weiterentwickelt werden. Insbesondere gilt es, im Verkehrs- und Wärmebereich die fossilen Energieträger zu einem grossen Teil durch umweltverträglich erzeugten Strom zu ersetzen. Für den Ausbau der erneuerbaren Energien ist in der Botschaft des Bundesrats vom 18.6.2021 ein neuer Zielwert von 17 TWh für das Jahr 2035 festgelegt worden (bisher: 11.4 TWh). Es ist vorgesehen, dass die Photovoltaik (PV) mit 14 TWh den grössten Teil dazu beiträgt. Als neuer Zielwert für 2050 sollen für die erneuerbaren Energien 39 TWh (bisher: 24.2 TWh) gesetzlich verankert werden (Schweizerischer Bundesrat, 2021).

2019 betrug die Stromproduktion aus erneuerbaren Quellen ohne Wasserkraft knapp 4.2 TWh, was 6.2 % der gesamten Netto-Elektrizitätsproduktion ausmacht (exkl. Verbrauch durch Speicherpumpen). Die PV hat dabei vor allem seit 2010 anteilmässig stark zugenommen und trägt, ohne Wasserkraft, mittlerweile 52 % zur erneuerbaren Stromproduktion bei (BFE, 2021).

Gemäss der kürzlich erschienenen *Statistik Sonnenenergie* für das Jahr 2020 (Hostettler & Hekler, 2021) ist der jährliche PV-Zubau in der Schweiz gegenüber dem Vorjahr um fast 50 % auf einen neuen Rekordwert angestiegen. Es wurden Panels mit einer Leistung von 476.3 MW installiert. Insgesamt waren per Ende 2020 Solarpanels mit einer Leistung von nahezu 3 GW installiert, die 4.7 % des Strombedarfs der Schweiz abdeckten (<https://www.swissolar.ch/services/medien/news/detail/n-n/statistik-sonnenenergie-2020-50-prozent-marktwachstum>).

Die PV-Potenziale in der Schweiz wurden in verschiedenen Studien analysiert und von Rohrer (2020) verglichen: Auf Dachflächen von Gebäuden in der Schweiz bestehe ein Potenzial von mindestens 25 TWh pro Jahr, auf anderen Infrastrukturen ein solches von 10 TWh pro Jahr. Bucher und Schwarz (2019) gehen bis 2035 von einem realisierbaren PV-Potenzial von rund 30 TWh auf Dachflächen und an Fassaden aus. Assouline, Mohajeri, & Scartezzini (2017) kamen bei ihren Modellberechnungen auf ein Leistungspotenzial von knapp 18 TWh für die Dachflächen in der Schweiz. Aktuelle Kosten-Potenzialkurven von verfügbaren Dachflächen zeigen, dass die technischen Voraussetzungen für die Stromproduktion aus Son-

nenenergie theoretisch bis zu 63 TWh pro Jahr betragen (noch ohne Fassaden), das wirtschaftliche Potenzial bei einer «Wirtschaftlichkeitsgrenze» von 15 Rp/kWh hingegen auf rund 10 TWh pro Jahr beschränkt bleibt. Bei abnehmenden Kosten und weniger Flächenbedarf könnte sich dieses jedoch vervielfachen (BFE, 2020).

Die aktuell vorliegenden Zahlen legen dar, dass die bestehenden Infrastrukturen kaum ausreichen dürften, um den Strombedarf für die Dekarbonisierung und den Ersatz der Kernkraftwerke bis ins Jahr 2050 zu decken (Rohrer, 2020). Nebst Suffizienz- und Effizienz-Massnahmen zur Senkung des Strombedarfs sollte deshalb eine vorausschauende Energieplanung die verschiedenen Möglichkeiten für die Erstellung von PV-Anlagen auf Freiflächen ausloten und diskutieren.

Studien zur Potenzialabschätzung der PV-Produktion losgelöst von Gebäuden sind in der Schweiz bisher kaum veröffentlicht worden. *Swissolar* und *Meteotest* rechnen mit einem Potenzial von 11.3 TWh (Strassen, Parkplätze, Autobahnböschungen), welches in den nächsten 30 Jahre realisiert werden könnte (Remund et al., 2019). Rohrer (2020) sieht in der Nutzung von bereits versiegelten Flächen, z.B. Strassen, Parkplätzen, Lärmschutzwänden, Perrons, Staumauern und Stauseen, diverse Ausbaumöglichkeiten. Zudem bestehe ein fast beliebig grosses Potenzial für grosse PV-Anlagen auf Freiflächen, zum Beispiel im Gebirge oder in Kombination mit der Landwirtschaft (Agro-Photovoltaik). Dass die PV unter den erneuerbaren Energien in ihrem ganzen Lebenszyklus den geringsten Flächenbedarf aufweist (Dhar, Naeth, Jennings, & Gamal El-Din, 2020), begünstigt deren Zukunftsperspektive zusätzlich.

1.2 Situation der Biodiversität in der Schweiz

Den Schutz der biologischen Vielfalt schreiben sowohl die Bundesverfassung (Art. 78) als auch internationale Verträge vor. So hat sich die Schweiz im Rahmen der *Biodiversitätskonvention* unter anderem dazu verpflichtet, das Aussterben bedrohter Arten zu unterbinden und die Erhaltungssituation für die am stärksten bedrohten Arten zu verbessern. Zu diesem Zweck wurde 2012 eine Biodiversitätsstrategie verabschiedet und 2017 in Form des *Aktionsplans Biodiversität* konkretisiert (BAFU, 2017a).

In den letzten 100 Jahren ist die Biodiversität in der Schweiz massiv zurückgegangen. Mehr als ein Drittel aller untersuchten Pflanzen- und Tierarten sowie knapp die Hälfte der bewerteten Lebensraumtypen gelten als bedroht und stehen auf den Roten Listen (BAFU, 2021). Besonders landwirtschaftlich genutzte Agrarökosysteme haben durch die intensive Bewirtschaftung einen starken Arten- und Lebensraumverlust erlitten. Dies ist vor allem zurückzuführen auf hohe Dünger- und Pestizidkonzentrationen in landwirtschaftlichen Gunstlagen und gleichförmige mechanische Bewirtschaftungsformen (BAFU, 2021).

Mit dem Verlust von Biodiversität gehen auch immense volkswirtschaftliche Kosten einher: In der EU wurden die jährlichen Kosten für die zu kompensierenden Ökosystemleistungen, die aus den Biodiversitätsverlusten resultieren, bis im Jahr 2050 auf rund 4 % des Bruttoinlandprodukts geschätzt (Guntern et al., 2014). Allein der Wert der Bestäubung durch Insekten beträgt in Europa rund 11 % des Produktionswerts der 100 meistgehandelten Nahrungsmittel (Guntern et al., 2014). Hinzu kommen unzählige weitere Öko-

systemleistungen, welche durch wildlebende Pflanzen und Tiere erbracht werden (z.B. natürliche Schädlingsregulation, Förderung der Bodenfruchtbarkeit, Abwasserreinigung, Rohstoffgewinnung, Erholungswert) (u.a. Widmer et al., 2021). Die Quantität und Qualität der erbrachten Ökosystemleistungen in der Schweiz sind mit denjenigen von EU-Ländern vergleichbar (BAFU, 2017b).

2. Auftrag und Projektorganisation

Die *Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften (ZHAW)* wurde mit Vertrag vom 13.1.2021 durch das *Bundesamt für Energie (BFE)* mit einer transnationalen Literaturstudie zum Thema «Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf die Biodiversität» beauftragt. Im Verlaufe der Studie zeigte sich immer mehr, dass nebst der Biodiversität im engeren Sinne auch weitere Umwelteinflüsse, z.B. landwirtschaftliche und landschaftliche Aspekte, eine zentrale Funktion für den künftigen Ausbau der Freiflächen-PVA spielen. Deshalb wurden schwerpunktmässig auch die Themenbereiche *Agro-Photovoltaik* und, in geringerem Umfang, *Floating Photovoltaik* sowie einige weitere zukunftssträchtige Nutzungsformen miteinbezogen.

In der vorliegenden Studie wird ein Überblick über den Stand der internationalen Forschung vermittelt, wobei mögliche Auswirkungen von Freiflächen-PVA auf die Biodiversität, auf einzelne Artengruppen sowie auf Ökosystemleistungen und landwirtschaftliche Nutzungsformen im Vordergrund stehen. Zusätzlich wird ausgeführt, welchen Einfluss Freiflächen-PVA auf mikroklimatische Standortfaktoren haben können (z.B. auf Boden- und Luftfeuchtigkeit, Boden- und Lufttemperaturen), um den direkten oder indirekten Einfluss dieser Faktoren auf die lokale Tier- und Pflanzenwelt abschätzen zu können. Ausserdem wird dargelegt, welche Lebensraumtypen innerhalb von Freiflächen-PVA biodiversitätsfördernd wirken und wie ein sachgerechter Unterhalt von Solarparks erfolgen könnte. Wissenslücken werden identifiziert, präzisiert und, wo immer möglich, in einen schweizerischen Kontext gebracht. Im Kapitel Synthese werden positive und negative Auswirkungen von Freiflächen-PVA gruppenübergreifend zusammengefasst und bewertet. Es werden Vorschläge gemacht, wie bestmögliche Voraussetzungen für ökologisch hochwertige Freiflächen-PVA geschaffen werden könnten. Abschliessend erste Vorschläge für das weitere Vorgehen formuliert.

Die Studie wurde durch eine Expertengruppe begleitet. Darin vertreten waren der PV-Spezialist Dr. Wieland Hintz vom *Bundesamt für Energie* und David Stickelberger, Geschäftsführer von *Swissolar*. Der Autor wurde zudem unterstützt durch Prof. Jürg Rohrer, Leiter Forschungsgruppe *Erneuerbare Energien* der ZHAW und durch Prof. Dr. Reto Rupf, Leiter Zentrum *Ecosystems and Biodiversity* der ZHAW. Simon Fankhauser, Praktikant und cand. BSc Umweltingenieurwesen ZHAW, führte ergänzende Recherchearbeiten durch und half bei der Finalisierung des Berichts und der Literaturliste.

3. Methodisches Vorgehen

Für die Literaturrecherchen wurden folgende Suchmaschinen und wissenschaftlichen Datenbanken konsultiert:

- *Web of Science* <https://www.webofscience.com>
- *Google Scholar* <https://scholar.google.com>
- *ScienceDirect* (Elsevier) <https://www.sciencedirect.com>
- *Swisscovery* (Plattform von rund 470 Schweizer Bibliotheken) <https://swisscovery.slsp.ch>

Der Basis-Suchstring ("photovoltaic*" OR "solar panel*" OR "solar module*" OR "solar energy" OR "solar power") wurde kombiniert mit folgenden Sub-Suchstrings:

... AND ("biodiversity" OR "species composition" OR "species community")

... AND ("wildlife*" OR "animal*" OR "faun*")

... AND ("insect*" OR "bird*" OR "bat*")

... AND ("vegetation*" OR "flor*")

... AND ("microclimate*" OR "soil*")

... AND (fallow* OR "industrial area*")

Ein separater Suchstring wurde für das Thema Agro-Photovoltaik definiert:

("agrophotovoltaic*" OR "agriphotovoltaic*" OR "photovoltaic agriculture")

Bei der Recherche nach deutschsprachiger Fachliteratur wurden analoge deutschsprachige Termini verwendet.

Um die Anzahl der vielen unspezifischen Suchstring-Treffer einzuschränken, erfolgten in einem Folgeschritt präzisierende Abfragen, die sich entweder auf den jeweiligen Titel der Studie (*Google Scholar*) oder auf deren Zusammenfassung (Abstract) (*Web of Science* und *ScienceDirect*) reduzierten. In einigen Fällen musste auch der Zeitraum des Erscheinungsdatums auf aktuellere Studien beschränkt werden, um die Trefferquoten in Grenzen zu halten. Bei *Swisscovery* wurden vor allem Suchstring-Treffer durch Abfragen via *Key Words* ermittelt.

- Bei der englischsprachigen Literatur ergaben sich mit dem genannten methodischen Vorgehen total 5'436 zu verifizierende Publikationen und Berichte. Davon wurden 100 für unsere Zwecke als relevant erachtet und in die Excel-Literaturliste aufgenommen, darunter auch eine holländische Studie mit englischem Abstract.
- Von insgesamt 901 zu verifizierenden deutschsprachigen Publikationen und Berichten wurden 37 als relevant erachtet und in die Literaturliste aufgenommen. Darunter befinden sich auch einzelne Artikel aus Fachzeitschriften, welche durch separate Recherchen ermittelt und nicht über die oben genannten

Suchstrings gefunden wurden, z.B. ausgewählte Internetartikel aus dem Photovoltaik-Magazin *pv magazine* (www.pv-magazine.de). Zudem wurden auch vereinzelt Publikationen in die Literaturliste aufgenommen, die nur im Literaturverzeichnis der Publikationen enthalten waren, nicht jedoch im Output der Suchstrings.

Die Kerninhalte der ausgewählten Fachartikel wurden in einer Excel- Literaturliste zusammengefasst und präzisiert. Einzelne Studien decken verschiedene Themenbereiche ab, z.B. kombinierte Auswirkungen von Freiflächen-PVA auf Fauna, Vegetation und Mikroklima. In solchen Fällen wurde für jeden einzelnen Themenbereich eine separate Zeile in der Literaturliste erstellt. Dadurch ergaben sich aus den 137 Fachartikeln total 180 Einträge (= Zeilen). Die Liste kann jederzeit aktualisiert und ergänzt werden.

Gliederung der Datenbank

Basisinformationen zur Publikation

- ID, Artikel ID
- Validität (mit Kategorien "Wissenschaftliches Paper mit Peer Review", "Fachartikel ohne Peer Review" und "Projektbericht/Buch/Internetartikel")
- Datentyp (mit Kategorien "empirische Primärdaten", "Sekundärdaten und Metastudien", "Modellberechnungen", "ohne Zuordnung")
- Autor(en)
- Titel
- Link (doi / URL)
- Jahr
- Name der Fachzeitschrift, des Berichts, der Heftreihe usw.
- Journal Typ (mit Kategorien "Energie", "Energie und Ökologie", "Ökologie allgemein", "Landwirtschaft", "Zoologie", "Diverses", "ohne Zuteilung")

Geografie und Habitattyp [Anmerkung: betrifft Verortung der Studie und betroffene Lebensraumtypen]

- Kontinent
- Land
- Habitattyp(en)

Beschrieb der Freiflächen-PVA

- Anlagentyp (mit Kategorien "PV-Anlage (PVA)", "Utility-Scale Solar Energy (USSE)", "Agro-Photovoltaik (APV)", "Floating Photovoltaik (FPV)", "andere")
- Spezifikation (z.B. Leistung in MWh)
- Grösse (Fläche der Anlage)

Fragestellung und Methodik der Studie

- Kernfrage(n)
- Indikator(en) (mit Kategorien "Fauna", "Vegetation", "Mikroorganismen", "Mikroklima/Boden/Wasser", "Landwirtschaft", "multifunktional")
- Taxon / Taxa (z.B. untersuchte Tiergruppe)

Hauptkenntnisse der Studie

- Auswirkungen auf Biodiversität/Landwirtschaft
- Effektstärke ("kein/gering", "mittel", "stark", "ohne Zuordnung")
- Präzisierung/Ergänzung

Begriffe

Utility-Scale Solar Energy (USSE)

Bei USSE-Anlagen handelt es sich um versorgungsrelevante, grossflächige Solarparks. Bezüglich Mindestfläche und -leistung bestehen keine einheitliche Definition. Die *Solar Energy Industries Association* als führende Handelsgruppe für Solarentwickler definiert USSE als Solarparks mit einer Leistung von mehr als 1 MW. Das *National Renewable Energy Laboratory* führt einen Schwellenwert von 5 MW auf, während die Website *Wiki-Solar* einen Schwellenwert von 10 MW angibt (<https://www.greentechmedia.com/articles/read/what-does-utility-scale-solar-really-mean>).



USSE-Anlage in den USA (Bild: <https://energy.mit.edu>)

Agro-Photovoltaik (APV) (= Agri-Photovoltaik)

Doppelnutzung von Agrarflächen für die Photovoltaik-Stromproduktion und die landwirtschaftliche Produktion, z.B. für den Anbau von Gemüse oder als Weidefläche für Nutztiere. Nahrungs- und Energiesicherheit werden als nicht konkurrierende Ziele betrachtet.



APV-Anlage in Deutschland (Bild: <https://www.baywa-re.com>)

Floating Photovoltaik (FPV)

Schwimmende PVA. Ihr Wirkungsgrad ist höher als derjenige von vergleichbaren Anlagen an Land, weil sie durch das Wasser gekühlt werden. FPV führt zu keinem Flächenverlust auf dem Kulturland.



FPV-Anlage in den Niederlanden (Bild: <https://www.solarify.eu>)

4. Ergebnisse der Literaturstudie

4.1 Allgemeines zu Umweltauswirkungen und Standorteignung von Freiflächen-PVA

4.1.1 Allgemeine Umweltauswirkungen

In einer interkontinental angelegten Metastudie wurden die Auswirkungen der Energiemixe von 150 Ländern u.a. auf mögliche negative Einflüsse auf die Biodiversität bewertet (Nematchoua, Asadi, & Reiter, 2020). Die negativen Effekte auf die biologische Vielfalt sind gemäss diesen Modellberechnungen in Subsahara-Afrika und im Nahen Osten viel gravierender als etwa in den USA oder in Europa. Solche Generalisierungen sind jedoch mit Vorsicht zu interpretieren, da jede Art oder Artengruppe einzigartige ökologische, verhaltensbezogene und lebensgeschichtliche Eigenschaften aufweist, die zusammengenommen ihre demografische Reaktion bestimmen (Moore-O'Leary et al., 2017). Auch im Falle von Freiflächen-PVA hat die Beurteilung der Umweltverträglichkeit deshalb immer standortspezifisch zu erfolgen (vgl. Kap. 4.1.2).

Eine Untersuchung von Turney & Fthenakis (2011) widmete sich den Umweltauswirkungen von PVA auf verschiedenen Ebenen. Im Vergleich zur traditionellen Stromerzeugung entpuppten sich 22 der 32 betrachteten Auswirkungen als positiv, von den verbleibenden 10 Auswirkungen waren 4 neutral und 6 erfordern gemäss den Autoren weitere Untersuchungen. Keine der Auswirkungen erwies sich als negativ. Im Vergleich zur traditionellen Stromerzeugung positiv hervorzuheben sind gemäss Autoren z.B. die um ein Vielfaches tieferen NO_x- und SO₂-Werte, die rund 30 x (z.T. bis zu 1000 x) geringeren Quecksilber-Emissionen und die rund 150 x geringeren Cadmium-Emissionen pro kWh produzierter Energie. Der Landverbrauch grosser USSE-Anlagen sei in etwa vergleichbar mit Kohlekraftwerken, wobei bei dieser Annahme wohl der Landverbrauch für die Kohlegewinnung miteingerechnet sein dürfte. Auch aus landschaftsästhetischen Überlegungen würden USSE-Anlagen im Vergleich zur traditionellen Stromerzeugung nicht negativ ins Gewicht fallen (pers. Anmerkung: sehr pauschale Aussage, nicht wissenschaftlich belegt). Katzner et al. (2013) weisen hingegen auf den hohen Landverbrauch und eine mögliche Landdegradation durch grössere Solaranlagen hin, was besonders in artenreichen, ökologisch sensiblen Gebieten mit vielen gefährdeten oder endemischen Arten ein grosses Konfliktpotenzial birgt.

In Solarparks gibt es im Durchschnitt 70-95 % verfügbaren Boden, auf dem die Biodiversität gefördert werden kann, falls naturnahe Managementpraktiken umgesetzt werden (Esteves, 2016, zitiert in Taylor et al., 2019). Die deutsche Solarparkfirma *WES Green* gibt in ihren Bebauungsplänen vor, dass nur 50-60 % der Flächen mit PV-Modulen belegt sein dürfen. Die so entstehenden besonnten freien Flächen können sich zugunsten von Wildbienen und anderen Insekten ungestört entwickeln (<https://www.sonnen-seite.com/de/umwelt/solarparks-schaffen-neue-lebensraeume-fuer-bienen-und-insekten>).

In einem Handlungsleitfaden für das deutsche Bundesland Baden-Württemberg wird vermerkt, dass generell ein Freiflächenanteil (Biotopfläche) von 25-50 % anzustreben sei. Diese Freiflächen seien als Gliede-

rungelemente zwischen den Modulfeldern und/oder randlich, also ausserhalb der Anlage, als Verbundelement zur Umgebung vorzusehen (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2019).

In einer Auftragsstudie von *Österreichs Energie* stellte Fechner (2020) fest, dass Solaranlagen einen grossen Beitrag zur regionalen Artenvielfalt liefern können und dass die Installation eines Solarparks eine deutliche ökologische Aufwertung der Flächen im Vergleich zur Acker- oder Intensivgrünlandnutzung ermöglicht. Dabei sei neben dem Alter der Solaranlagen die Nähe zu Lieferbiotopen der entscheidende Faktor für eine Zuwanderung und die Biodiversität einer Anlage.

Semeraro et al. (2020) entwickelten einen konzeptionellen Rahmen für Freiflächen-PVA in Synergie mit Ökosystemdienstleistungen auf begrünten Flächen in Apulien (Italien). Ihr Fokus richtete sich auf die Verbindung von wirtschaftlichem Erfolg mit sozialem und ökologischem Fortschritt, basierend auf dem Konzept der multifunktionalen Landnutzung. Die Modellapplikationen ergaben u.a. eine Erhöhung der Solarenergieproduktion, verbesserte Lebensraumbedingungen für Tiere und eine Minderung der hohen Lufttemperaturen.

Das wohl umfassendste Review zum Thema Solarparks und Umwelt führten Hernandez et al. (2014) durch. In den folgenden Kapiteln wird auf zahlreiche Originalpublikationen daraus Bezug genommen.

4.1.2 Standorteignung

Agha et al. (2020) messen der wohlüberlegten Standortwahl auch eine entscheidende Bedeutung für die gesellschaftliche Akzeptanz erneuerbarer Energien zu. Um eine verbesserte Naturverträglichkeit von Solarparks zu erreichen, sind bevorzugt Flächen mit geringer naturschutzfachlicher Bedeutung und hoher Vorbelastung (z.B. zuvor intensiv genutztes Ackerland) auszuwählen, verbunden mit einem qualitativ hochwertigen Flächenmanagement in der anschliessenden Betriebsphase (NABU & BSW Solar, 2021). Wagegg & Trumpp (2015) propagieren ebenfalls eine sorgfältige Flächen- und Typenevaluation für Solarparks. Das bestehende Terrain und die ursprüngliche Vegetation sollten besonders dann belassen werden, wenn es sich um einen ökologisch hochwertigen Lebensraum handelt (z.B. blütenreiche Glatthaferwiese, Halbtrockenrasen) (Wilkening & Rautenstrauch, 2019).

Im Bericht *Nationale Naturlandschaften und erneuerbare Energien* werden Anforderungen für eine natur- und landschaftsverträgliche Nutzung erneuerbarer Energien formuliert. Folgende Standorte werden dabei als potenziell geeignet bezeichnet (Gehrlein et al., 2017):

- Flächen, die in ihrer Biotopverbund- und Habitatfunktion bereits wesentlich beeinträchtigt sind.
- Flächen, deren Bodenfunktionen z. B. durch Versiegelung, Verdichtung oder Kontamination bereits stark vorbelastet sind.
- Flächen, deren Landschaftsbild durch Bebauung und/oder andere technische Objekte bereits erheblich verfremdet ist.
- Flächen, deren Bebauung keinen weiteren Freiraumverlust darstellen.

Dazu zählen beispielsweise Siedlungsbrachen, Flächen in grösseren Gewerbegebieten, Zonen entlang grosser Verkehrsstrassen/Schienenwegen, Lärmschutzeinrichtungen, Abfalldponien und Halden, Flächen

mit hoher Bodenverdichtung, Konversionsflächen mit hohem Versiegelungsgrad und ohne besondere naturschutzfachliche bzw. ästhetische Bedeutung sowie sonstige durch Infrastruktureinrichtungen veränderte Landschaftsausschnitte (Gehrlein et al., 2017; Peschel, Peschel, Marchand, & Hauke, 2019).

Kim et al. (2021) werfen einen kritischen Blick auf die aktuelle Standortwahl von Freiflächen-PVA in Japan. Sie behindere Naturschutz-Bemühungen, weshalb vermehrte Anreize für PVA in städtischen Gebieten notwendig seien. Global betrachtet, überlagern sich Anlagen für erneuerbare Energien mit über 1'600 Schutzgebieten und 40 Wildnisgebieten. Solche Überlagerungen sind v.a. in Westeuropa vorzufinden, zunehmend aber auch in Südostasien (Rehbein et al., 2020).

4.2 Auswirkungen auf die Fauna

4.2.1 Allgemeine Auswirkungen

In einer Metastudie aus dem Jahr 2013 fanden die Autoren keine verfügbaren wissenschaftlichen und peer-reviewten Studien zu den Auswirkungen von Solaranlagen auf die Fauna (Northrup & Wittemyer, 2013). Eine Literaturstudie von Moore-O'Leary et al. (2017) ergab, dass es bislang nur wenige von Fachleuten überprüfte Veröffentlichungen gibt, die sich mit den Auswirkungen von USSE-Anlagen auf bestimmte Tierarten befassen. Mit Blick auf Wildtiere (*wildlife impacts*) gelangten Fthenakis et al. (2011) zu einer vergleichbaren Schlussfolgerung: "In der Literatur wurden nur wenige Veröffentlichungen zum Thema PV gefunden, und diese waren kurz, qualitativ und basierten auf rein hypothetischen Analysen". Eine aktuelle, interkontinentale Metastudie fasst die Situation bezüglich Fauna und Flora folgendermassen zusammen: "Trotz einiger weniger Studien sind in der Literatur die Auswirkungen von Solarkraftwerken und ihrer Umgebung nicht umfassend behandelt worden" (Dhar et al., 2020).

Lovich & Ennen (2013) vermerken, dass die verfügbaren Daten bisher nicht ausreichen, um die kumulativen Auswirkungen von Solarparks auf regionale Wildtierpopulationen abzuschätzen (z.B. Einfluss des Anlagendesigns, Kriterien für Standortwahl) und dass sich die verfügbare Literatur v.a. auf nicht publizierte Reports beschränke. Als potenziell negativ erachten Lovich & Ennen (2013) sowie Northrup & Wittemyer (2013) die mit der Erstellung einer USSE-Anlage möglicherweise einhergehende Fragmentierung von Wildtier-Lebensräumen (Barrieren für Genfluss), den erhöhten Lärm, die Erzeugung elektromagnetischer Felder, die Veränderung des Mikroklimas, den möglichen Einsatz von Herbiziden und Staubbindungsmiteln, den erhöhten Wasserverbrauch und die grössere Gefahr für Feuer in Trockenperioden. Die genannten Faktoren werden jedoch nur in einem hypothetischen Gesamtkontext betrachtet und basieren nicht auf empirisch erhobenen Daten.

Agha et al. (2020) diskutieren Massnahmen zur Minimierung negativer Einflüsse auf die Fauna. Sie postulieren einen reduzierten negativen Einfluss auf die Fauna bei der Erstellung von Anlagen auf belasteten Standorten (z.B. Industriebrachen), auf normal genutzten Landwirtschaftsflächen und auf Flughäfen, wo die Verringerung des Wildbestandes gesellschaftlich akzeptiert sei (Reduktion der Kollisionsgefahr mit Flugzeugen). Die ökologischen Auswirkungen des Ausbaus von erneuerbaren Energien auf die Fauna seien jedoch noch sehr unsicher, da BACI-Studien (*Before-After-Control-Impact*) fehlen würden.

Zum Thema Wildtierschutz in USSE-Anlagen wurde bei Fachleuten aus den Bereichen Ökologie, Naturschutz und Energie eine Umfrage in den USA durchgeführt. Die Quintessenz lautete wie folgt: "Unser derzeitiges Wissen über die Auswirkungen von Solaranlagen auf wildlebende Tiere ist trotz des Tempos und Umfangs der Entwicklung begrenzt" (Chock et al., 2021). Bei den Forschungsprioritäten und den Schlüsselfragen sollen gemäss Umfrage BACI-Studien im Vordergrund stehen. Die Zusammenarbeit zwischen Industrie, Forschung und Verwaltung sollte gefördert werden, ähnlich wie in der Windenergiebranche, wo diese bereits besser etabliert sei. Zudem gelte es, die Tierverhaltensforschung (Ethologie) zu verbessern, um die Zahl der tödlichen Unfälle mit Wildtieren zu reduzieren (Chock et al., 2021).

Landschaftsveränderungen durch Freiflächen-PVA, besonders wenn sie grossflächig sind, können sich direkt auf die Lebensraumqualität und Migrationsrouten auswirken und zu Lebensraumverlust und Fragmentierung führen. Hingegen ist es bei richtigem Management auch möglich, die Biodiversität zu vergrössern und neue Lebensräume für gefährdete Tiere und Pflanzen zu schaffen (Dhar et al., 2020). Gerade in den heiklen Wintermonaten könnten Solarparks Wildtieren neue Nahrungsquellen eröffnen (Wagegg & Trumpp, 2015). Als mögliche Fördermassnahmen für die Fauna erwähnen Taylor et al. (2019) die Installation und/oder Beibehaltung von Begrenzungselementen wie Hecken, Gräben, Steinmauern, Magerrasen, Feldrändern und Gebüsch, sowie die Schaffung von Wildblumenwiesen mit Pollen- und Nektarpflanzen und die Installation von künstlichen Strukturen wie Nistkästen, Überwinterungsplätzen und Holzstapeln.

Bei der Abschätzung der Umweltverträglichkeit und bei der Evaluation möglicher Auswirkungen eines Solarparks auf die lokale Fauna ist die umgebende Landschaft stets miteinzubeziehen. Falls nämlich Lebensräume, auf welche ein Solarpark erstellt werden soll, in Form von Ausweichhabitaten in genügender Ausdehnung und Dichte in unmittelbarer Umgebung vorkommen (intakter Lebensraumverbund), ist der mögliche negative Effekt auf die mobile Fauna viel geringer, als wenn auf dem zu bebauenden Gelände seltene und einzigartige Lebensräume vorkommen (Wilson & van Zyl, 2012). Zentral für die Zuwanderung und somit für die Biodiversität der Anlage ist die Distanz zu Lieferbiotopen, die möglichst unter 500 m betragen sollte (Fechner, 2020).

Vor Baubeginn sind seltene Arten zu evakuieren und ein temporärer Schutzzaun zu errichten, um eine Rückwanderung während der Bauphase zu verhindern. Das bestehende Terrain und die ursprüngliche Vegetation sollten möglichst belassen werden (Wilkening & Rautenstrauch, 2019).

4.2.2 Säugetiere (ohne Nutztiere)

Grundsätzlich bestehen keine Hinweise auf eine Meidung von PVA durch Mittel- und Grosssäuger (Günnewig, Sieben, Püschel, Bohl, & Mack, 2007; Herden, Rasmus, & Gharadjedaghi, 2009). Van der Zee et al. (2019) erwähnen Hasen, Kaninchen und Rehe, die innerhalb von Freiflächen-PVA beobachtet wurden, vermutlich begünstigt durch eine abwechslungsreiche Vegetation mit Wildblumen-Ansaaten. Möglicherweise könnten aber auch ursprünglich vorhandene, wertvolle Lebensräume durch die Erstellung eines Solarparks für Mittel- und Grosssäuger verloren gehen (Badelt et al., 2020).

In einer der weltweit grössten USSE-Anlagen, dem Topaz Solarpark in den USA (Gesamtleistung 550 MW), fanden sich Säugetier-Arten mit Schutzstatus wie der Amerikanische Dachshund und der seltene Kitfuchs (Sinha, Hoffman, Sakers, & Althouse, 2018) .

Als Schutz vor Diebstahl und Vandalismus werden Solarparks oftmals eingezäunt. Mehrere Berichte weisen darauf hin, dass die Umzäunung grossflächiger USSE-Anlagen Kleinsäuger vor dem Zugriff durch externe Prädatoren und vor Störungen aus der Umgebung bewahren könnte (z.B. Moore-O'Leary et al., 2017). Die Berichte stützen sich jedoch nur auf persönliche Einschätzungen und Zufallsbeobachtungen ab, so etwa auf Angaben einer Solarbaufirma aus Kalifornien (Bruce, 2019). Wissenschaftlich erhärtete Informationen hierzu konnten keine vorgefunden werden.

Andere Autoren weisen auf die negative Barrierewirkung von Zäunen hin (Herden et al., 2009; Wagegg & Trumpp, 2015), z.B. in Wildwechseln, weshalb Migrationskorridore für Grosssäuger eingeplant werden müssten (Demuth et al., 2019).

Es wird vorgeschlagen, dass die Umzäunungen Öffnungen am unteren Rand aufweisen sollten, damit kleinere Wildtiere passieren können (Wilkening & Rautenstrauch, 2019). Die Höhe der Zaununterkante müsse zu diesem Zwecke mindestens 10-15 cm betragen. Auf Stacheldraht im Bodenbereich gelte es zu verzichten (Demuth et al., 2019). In NABU & BSW Solar (2021) werden zur Verbesserung der Durchgängigkeit für Kleinsäuger entweder ein angemessener Bodenabstand des Zaunes von 20 cm oder ausreichende Maschengrößen im bodennahen Bereich erwähnt. Für Grosssäuger seien ab einer "bestimmten Anlagengröße" Querungsmöglichkeiten vorzusehen. Günnewig et al. (2007) betonen, dass auch mittelgrosse Säugetiere wie Feldhasen, Füchse oder Dachse einen ausreichend bemessenen Durchschlupf zur Verfügung haben sollten.

Eine ungestörtere Vegetationsentwicklung und das Fehlen einer mechanischen Bodenbearbeitung kann in Solarparks gemäss Herden et al. (2009) zu einer Aufwertung der Lebensraumfunktionen für Kleinsäuger führen, auch wenn baubedingte Störungen eine zeitweise Meidung verursachen könnten.

Im Gegensatz zu Windkraftanlagen gibt es keine Untersuchungen, die sich auf wissenschaftlicher Ebene mit den Auswirkungen von PVA auf Fledermäuse befassen (Taylor et al., 2019, Harrison, Lloyd, & Field, 2016). Erste Hinweise ergeben sich aus einer kleinen Vorstudie aus Südengland, wo innerhalb von acht Solarparks gleich viele Fledermaus-Arten vorgefunden wurden wie in den benachbarten Kontrollflächen, jedoch signifikant weniger Individuen. Aufgrund von Fehlfunktionen der Fledermaus-Detektoren sind diese Ergebnisse aber mit Vorsicht zu geniessen (Montag, Parker, & Clarkson, 2016).

Vereinzelte Beobachtungen zeigen, dass Fledermäuse horizontale Flächen mit Gewässern und vertikale Flächen mit offenen Flugwegen verwechseln können, aber es gibt keine Hinweise darauf, dass dadurch die Kollisionsgefahr erhöht ist (Taylor et al., 2019). Greif et al. (2017) stellten fest, dass Fledermäuse sowohl unter Laborbedingungen als auch in der Natur mit vertikal angeordneten reflektierenden Platten kollidierten. Obwohl keine Opfer zu beklagen waren, sollten deshalb glatte, vertikale Oberflächen an kritischen Orten wie Zugrouten, wichtigen Nahrungshabitaten oder Fledermauskolonien vermieden werden. Dies gilt auch für Solarpanels, die in einem steileren Winkel angeordnet sind.

Freiflächen-PVA könnten bei geeigneter extensiver Bewirtschaftung und dem dadurch zu erwartenden grösseren Insektenreichtum die Funktion als Jagdhabitats für Fledermäuse übernehmen (Peschel et al., 2019). Die in Kapitel 4.2.6 beschriebene Fehlinterpretation von spiegelnden PVA als Wasseroberfläche durch bestimmte Insektengruppen könnte eine Attraktionswirkung auf Fledermäuse ausüben, welche sich von Grossinsekten ernähren (Moore-O'Leary et al., 2017). Eine empirische Evidenz hierzu liegt jedoch nicht vor.

Für nachtaktive Insektivoren, so auch für Fledermäuse, kann sich das Nahrungsangebot in beleuchteten Solarparks verbessern, da Insekten wie beispielsweise Nachtfalter durch das Licht angelockt werden (Brunet et al., 2020). Quantitative Untersuchungen hierzu liegen jedoch bis anhin nicht vor.

GIS-Analysen werden als geeignetes Planungsinstrument für die Evaluation von unerwünschten Überlappungen zwischen dem Vorkommen schützenswerter und empfindlicher Wirbeltierarten (oder artenreichen Lebensräumen generell) und potenziellen USSE-Standorten empfohlen. Voraussetzung für die Erstellung von solchen Habitatmodellen ist jedoch die Verfügbarkeit von faunistischen Verbreitungskarten (Thomas et al., 2018).

Die Vor- und Nachteile von Freiflächen-PVA auf die Nutztierhaltung in der Landwirtschaft werden in Kapitel 4.5 näher erörtert.

4.2.3 Vögel

Eine Literaturrecherche zu den Auswirkungen von Windkraft- und Solaranlagen auf Vögel und Fledermäuse in den USA und Kanada ergab 193 Studien zu Windkraftanlagen, jedoch nur deren 10 zu Solaranlagen (inkl. Berichte und Gutachten) (Conkling, Loss, Diffendorfer, Duerr, & Katzner, 2021).

Auswirkungen wie direkte Mortalität (Stromschläge an Sammelleitungen, Kollisionen mit Spiegeln), Habitatverlust, Meidung und Verdrängung sind in der Regel additiv und treten gemeinsam mit anderen natürlichen oder anthropogenen Einflüssen auf (Dwyer, Landon, & Mojica, 2018). Dementsprechend sind oft nur vage Aussagen zu direkten Auswirkungen von Freiflächen-PVA auf die Avifauna möglich.

Walston et al. (2016) führten in Südkalifornien, gemäss eigenen Angaben, die erste übersichtsmässige Einschätzung der Vogelsterblichkeit an bestehenden USSE-Anlagen durch. Aus den verfügbaren Vogelmonitoring- und Mortalitätsinformationen kamen sie zum Schluss, dass die geschätzte jährliche Gesamtmortalität an USSE-Anlagen ähnlich hoch sei wie im Windenergiesektor. Hochgerechnet ergeben sich demnach ca. 16'000 - 59'000 Todesfälle von Vögeln an USSE-Anlagen in Südkalifornien, was einer «capacity-weighted average mortality rate» von 2.7 bis 9.9 Vögeln pro MW und Jahr entspricht. Extrapoliert auf die gesamte USA ergibt sich so eine geschätzte jährliche Mortalität von 37'800 bis 138'600 Vögeln, basierend auf USSE-Projekten, die entweder installiert oder im Bau sind. Dies sei um Grössenordnungen niedriger als bei «anderen Formen der Mortalität» (Walston et al., 2016).

Auf eine ähnliche Grössenordnung kamen Kosciuch et al. (2020), welche die Vogelsterblichkeit in 10 USSE-Anlagen in Kalifornien und Nevada während 13 Jahren ermittelten. Sie schätzten die durchschnittliche jährliche Sterblichkeitsrate auf rund 2.5 Vögel pro MW und Jahr. Die Ursache der Mortalität konnte für ca. 61 % der intakten Kadaver nicht bestimmt werden. Bei einem nicht-tödlichen Aufprall könnten Vögel

durch Sedierung anfälliger gegenüber Fressfeinden sein (Dwyer et al., 2018). Harrison et al. (2016) und Herden et al. (2009) schätzen das Kollisionsrisiko für Vögel an PV-Panels als gering ein, v.a. im Vergleich zur begleitenden Infrastruktur wie etwa Freileitungen.

Bei einem Vergleich der Avifauna von Flugplätzen mit PVA und nahegelegenen Wiesen ohne PVA resultierte eine etwas höhere Anzahl an Vogel-Arten in Wiesen ohne PVA (46 Arten versus 37 Arten). Zudem war der Anteil grosser Vögel (≥ 1.125 kg) auf Flugplätzen mit PVA kleiner als in den nahegelegenen Wiesen ohne PVA. Die Aussagekraft dieser Studie ist jedoch beschränkt, da sie sich nur auf fünf Paarvergleiche abstützt (DeVault et al., 2014).

Insbesondere in ansonsten intensiv genutzten Agrarlandschaften könnten sich extensiv genutzte Freiflächen-PVA in Deutschland zu wertvollen avifaunistischen Lebensräumen entwickeln (Demuth et al., 2019), so etwa zugunsten von Feldlerche, Rebhuhn und Schafstelze, vermutlich aber auch für Wachtel, Ortolan und Grauammer. Möglicherweise könnten auch Wiesenbrüter profitieren, die keine grossen Offenlandbereiche benötigen, z.B. Wiesenpieper oder Braunkehlchen (Günnewig et al., 2007).

Das Braunkehlchen stand zusammen mit der Grauammer im Zentrum eines Forschungsprojekts auf einer 75 ha grossen Freiflächen-PVA in Deutschland (Bundesland Mecklenburg-Vorpommern). Nach deren Errichtung erfolgte eine Verlagerung der Braunkehlchen-Brutgebiete von der PVA in die Umgebung mit anschliessender Wiederbesiedlung der ursprünglichen Flächen. Der Rückgang des Grauammer-Bestands war nach Errichtung der PVA moderater als beim Braunkehlchen, jedoch erfolgte dann keine Erholung, sondern eine kontinuierliche Abnahme über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg (Heindl, 2016).

Moore-O'Leary et al. (2017) postulieren, dass vor allem verhaltensflexible Kulturlandvögel von Freiflächen-PVA profitieren. Wie Funde aus einer 39 ha grossen USSE-Anlage am Rand eines Industrieparks von Shell in den Niederlanden belegen, können aber durchaus auch seltene Lebensraumspezialisten unter den Vögeln vorkommen, so z.B. der Steinschmätzer und selten gewordene Kulturlandvögel wie die Feldlerche (Biesmeijer, van Kolfschoten, Wit, & Moens, 2020).

In einem deutschen Projekt wurden die Brutvögel von zwei grossflächigen PVA im Bundesland Brandenburg auf einer Fläche von 60 ha bzw. 54 ha erfasst. Dabei resultierten folgende Ergebnisse (Tröltzsch & Neuling, 2013):

- Die umliegenden, un bebauten Gebiete wiesen viel mehr Brutvogel-Arten auf als die Solarparks.
- Höhere Populationsdichten im Umland waren insbesondere bei Habitatspezialisten wie etwa Wiedehopf, Neuntöter, Steinschmätzer, Braunkehlchen, Ziegenmelker und Brachpieper zu verzeichnen. Zwischen den Sonnenkollektoren brüteten aber vereinzelt auch anspruchsvollere Arten, z.B. der Bluthänfling.
- Solarparks beherbergten vor allem Arten, die nur kleine Spalten oder Löcher für ihre Brut benötigen, z.B. Bachstelze und Hausrotschwanz.
- Strukturereichtum (Steinhaufen, Sandhaufen, Holzhaufen, offene Sandflächen) sowie naturschutzgerechtes Mähen zwischen den Panels werden als essenziell erachtet.

In einem weiteren deutschen Forschungsprojekt wurden im Bundesland Niedersachsen umfassende Informationen zur Vogel-Fauna von Freiflächen-PVA zusammengetragen. Zusammenfassend ergaben sich folgende Resultate (Badelt et al., 2020):

- 28 der in Niedersachsen gefährdeten Vogel-Arten des Offenlandes (62.2 %) konnten in Freiflächen-PVA nachgewiesen werden, darunter 16 Arten, welche diese als Bruthabitat nutzten: Wachtel, Rebhuhn, Neuntöter, Raubwürger, Turteltaube, Heidelerche, Feldlerche, Gelbspötter, Gartengrasmücke, Sperbergrasmücke, Braunkehlchen, Feldsperling, Baumpieper, Bluthänfling, Grauammer und Goldammer.
- Für Graureiher, Rohrweihe, Rotmilan, Baumfalke, Turmfalke, Rauchschwalbe und Star wurde die Nutzung als Nahrungshabitat nachgewiesen.
- Für Weissstorch, Wiesenweihe und Steinkauz wird die Nutzung zur Nahrungssuche in den Randbereichen als wahrscheinlich bis möglich eingeschätzt, wobei die Grösse und Form der nicht überbauten Fläche entscheidend seien.
- Arten, die grossflächiges Offenland benötigen, z.B. Grosser Brachvogel, Uferschnepfe, Rotschenkel und Kampfläufer, finden in Freiflächen-PVA keine geeigneten Bruthabitate vor und treffen nur möglicherweise auf artgerechte Nahrungshabitate.

Im deutschen Bundesland Thüringen fand 2011 eine Untersuchung zur Avifauna in einem 25 ha grossen Solarpark statt. Die Erkenntnisse waren vergleichbar mit den bereits oben vorgestellten Studien, so etwa, dass Offenland-Arten Solaranlagen zur Brutzeit regelmässig nutzen. Weitere Arten könnten hinzukommen, wenn grössere Gehölze vorhanden seien (Lieder & Lumpe, 2011).

In fünf Freiflächen-PVA im deutschen Bundesland Bayern, die zwischen 2001 und 2010 erstellt wurden und zwischen 3 und 12.5 ha messen, ergab sich eine Aufwertung durch den Betrieb der Solarparks im Vergleich zur vorherigen Acker- oder Intensivgrünland-Nutzung. Im Jahr 2013 fanden sich dort beachtliche 43 Vogel-Arten. Nebst weit verbreiteten und häufigen Vertretern wurden einzelne Anlagen auch durch Arten der Roten Liste in Beschlag genommen, z.B. durch Rebhuhn, Feldlerche, Baumpieper, Bluthänfling und Schafstelze (Raab, 2015).

In einem der grössten Solarparks Südafrikas (180 ha, 96 MW) waren Artenreichtum und Dichte von Vögeln innerhalb der USSE-Anlage tendenziell kleiner als in der Randzone und als im angrenzenden, nicht umgestalteten Land. Anscheinend wurden bisher keine bedrohten Arten beeinträchtigt, aber gemäss Autoren bestehe hierzu noch weiterer Forschungsbedarf (Visser, Perold, Ralston-Paton, Cardenal, & Ryan, 2019).

Die Abstände der Modulreihen scheinen einen erheblichen Einfluss auf die Individuenzahl und die erreichten Populationsdichten von gefährdeten, thermophilen Vögeln des Grünlands zu haben. Besonnte Streifen von 3 m und mehr sollen dabei besonders bestandsfördernd auf solche Habitatspezialisten wirken (Peschel et al., 2019).

Bodenbrütende Vögel könnten dank Sicherheitszäunen geschützte Brutareale innerhalb von PVA vorfinden (Taylor et al., 2019). Für die bodenbrütende Feldlerche konnte dies in 12 Solarparks im Süden Grossbritanniens jedoch nicht bestätigt werden, da gemäss Autoren diese Art (wie auch andere Bodenbrüter)

«freie Sicht» benötigen (Montag et al., 2016). Hingegen fanden die Autoren mehr Vogel-Arten innerhalb als ausserhalb der 12 Solarparks, jedoch ohne statistische Signifikanz.

Die in Kapitel 4.2.6 näher beschriebene Fehlinterpretation von spiegelnden PVA als Wasseroberfläche durch bestimmte Insektengruppen könnte eine Attraktionswirkung auf insektivore Vögel ausüben (Solarpark als Nahrungshabitat) (Moore-O'Leary et al., 2017). Medienberichte und Berichte aus der grauen Literatur weisen darauf hin, dass Wasservögel grosse Solaranlagen mit Gewässern verwechseln könnten (Taylor et al., 2019). Bernáth et al. (2001) beobachteten Vögel, die versuchten aus Plastikfolien zu trinken, d.h. sie könnten durch polarisiertes Licht angezogen werden. Vögel, die im Flug trinken, z. B. Schwalben, werden als besonders gefährdet für Kollisionen mit PV-Panels (die auch polarisiertes Licht reflektieren) eingestuft, während das Risiko für sitzend trinkende Vögel als kleiner bewertet wird (Taylor et al., 2019). Lichtreflexe der Anlage bei Sonnenschein könnten für Vögel störend wirken (Wagegg & Trumpp, 2015), was jedoch durch Günnewig et al. (2007) und Herden et al. (2009) als wenig relevant eingestuft wird. Günnewig et al. (2007) weisen auf eine mögliche Stör- und Scheuchwirkung («Silhouetteneffekt») durch Solarpanels hin, was zu einer Entwertung avifaunistisch wertvoller Lebensräume führen könnte, v.a. für typische Wiesenvögel wie den Kiebitz. Demuth et al. (2019) betrachten solche Störeffekte hingegen als noch zu wenig erforschtes Terrain.

Schattenwurf durch PVA wird als mögliche Gefahr für erhöhten Vogelschlag auf Flughäfen erachtet, weil es dort oft an Schatten spendenden Strukturen fehlt und die Vögel durch den Schattenwurf von Solarpanels angelockt werden könnten. Dies umso mehr, als dunkle PV-Panels eine Attraktionswirkung auf Insekten ausüben und insektivore Vogel-Arten von einem «reich gedeckten Tisch» profitieren könnten (Sreenath, Sudhakar, & Yusop, 2020).

Thermische Luftströmungen oberhalb von Freiflächen-PVA könnten Greifvögel anlocken (Dwyer et al., 2018). Gemäss Beobachtungen aus Grossbritannien wurden Turmfalke und Waldkauz in Solarparks beobachtet, Turmfalke und Rotmilan sogar bei der aktiven Nahrungssuche. Beim Schreiadler und auch bei anderen Greifvögeln wurde gemäss den Autoren kein ausgeprägtes Meideverhalten gegenüber PVA festgestellt.

Aus Deutschland sind zwar innerhalb von PVA keine brütenden Greifvögel bekannt, aber es wurden Überflüge und Nahrungssuchflüge von Rotmilan, Mäusebussard, Sperber, Wespenbussard und Baumfalke festgestellt. Dabei erfolgten auch Jagdflüge im unmittelbaren Randbereich der PVA und über einem ca. 20 m breiten Grünstreifen innerhalb der PVA, und die Modulkanten wurden als Sitzwarten genutzt (Scheller, Mika, & Köpke, 2020). Ob Greifvögel innerhalb von PVA jagen, hängt vom Abstand der Modulreihen und der Bewirtschaftung der Flächen ab, wobei sich eine extensive Grünlandbewirtschaftung positiv auf das Jagdverhalten auswirken soll (Scheller et al., 2020).

Verunreinigung durch Vogelkot auf Solarpanels wird eine drosselnde Wirkung auf die Stromproduktion zugeschrieben (Harrison et al., 2016).

Ein Forscherteam des *Argonne National Laboratory* in Illinois (USA) lancierte 2020 ein Projekt, um das Verhalten von Vögeln an grossen Solaranlagen zu untersuchen und mittels *Artificial Intelligence* Erklärungsmuster für Todesfälle zu finden. Das Team entwickelte dazu ein Kamerasystem, das klassifizieren

kann, ob es sich um einen Vogel handelt und, falls ja, ob dieser Vogel kollidiert (<https://www.wired.com/story/why-do-solar-farms-kill-birds-call-in-the-ai-bird-watcher>).

Anlässlich des GEO-Tags der Natur vom 12./13. Juni 2021 wurde im Solarpark Klein Rheide in Schleswig-Holstein der stark gefährdete Wiesenpieper nachgewiesen. Turmfalken wurden in verschiedenen Solarparks dabei beobachtet, wie sie ihren Nachwuchs in Solarparks führen, um ihnen die Jagd nach Kleinsäu- gern zwischen und unter den Modulen beizubringen. Beobachtungen von Kranichen auf Nahrungssuche im Solarpark Eberswalde in Brandenburg widerlegen die Ansicht, wonach diese Art Vertikalstrukturen stets meidet (https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Bildergalerien/Geo-Tag_der_Natur/21-10-18_bne_GEO_Tag_der_Natur_-_Solarparks_Auswertung.pdf).

4.2.4 Reptilien und Amphibien

Reptilien

Zu den Auswirkungen von Solarparks auf Reptilien und Amphibien liegen gemäss Literaturrecherche bis- lang keine quantitativen wissenschaftlichen Studien vor. Reptilien schätzen aber gemäss Beobachtungen von van der Zee et al. (2019) besonnte Streifen zwischen den Panelreihen, und Eidechsen sollen die sich schnell erwärmenden Oberflächen der PV-Panels regelmässig nutzen.

Bei sachgemässer extensiver Bewirtschaftung der PVA-Anlagen sind hohe Insektendichten möglich (vgl. Kap. 4.2.5 und 4.2.6), was sich positiv auf das Nahrungsangebot von Reptilien auswirken dürfte. Falls ge- eignete Versteckplätze und Eiablagehabitate vorkommen, sind durchaus hohe Individuendichten denkbar. Abstände von mindestens 3 m zwischen den Modulreihen sollten gemäss Einschätzung von Peschel et al. (2019) dank der höheren Sonneneinstrahlung einen positiven Einfluss auf die Populationsdichten von Reptilien haben. Reptilien könnten zudem innerhalb von umzäunten Solarparks besser vor menschlichen Störungen und Fressfeinden geschützt sein (Moore-O'Leary et al., 2017).

Anlässlich des GEO-Tags der Natur vom 12./13. Juni 2021 gelangen in mehreren deutschen Solarparks Nachweise der vielerorts sehr selten gewordenen Zauneidechse (https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Bildergalerien/Geo-Tag_der_Natur/21-10-18_bne_GEO_Tag_der_Natur_-_Solarparks_Auswertung.pdf).

Amphibien

Bei extensiver Nutzung eines Solarparks ohne Einsatz von Düngemitteln wären die Voraussetzungen für die Schaffung nährstoffarmer Amphibiengewässer gegeben. Trotzdem finden sich dort bis anhin kaum Fortpflanzungsbiotope für Amphibien.

Auch wenn das Vorkommen von Gewässern in Solarparks die Ausnahme ist, können sie sich bei entspre- chender Ausgestaltung sehr wohl als Landlebensraum (Winter- oder Zwischenquartier) oder auch als Wanderroute eignen. Geringe Abstände zwischen den Modulreihen dürften vorteilhaft sein, da Amphibien insbesondere in der warmen Jahreszeit Beschattung vorziehen (Peschel et al., 2019). Abzäunungen soll- ten auf Amphibien keine Barrierewirkung ausüben, sofern ein angemessener Bodenabstand des Zaunes

von mindestens 20 cm oder ausreichende Maschengrößen im bodennahen Bereich vorhanden sind (NABU & BSW Solar, 2021).

In einer deutschen PVA, die Ende 2016 im Bundesland Brandenburg errichtet wurde, wurden die Ansprüche von dort vorkommenden Moorfröschen bei der Planung so berücksichtigt, dass Teile der Anlage selbst als Kompensationsflächen dienten (Peschel et al., 2019).

Die stark gefährdete Kreuzkröte profitierte im Solarpark Klein Rheide in Schleswig-Holstein von lückiger Vegetation mit Flachwasserbereichen (https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Bildergalerien/Geo-Tag_der_Natur/21-10-18_bne_GEO_Tag_der_Natur_-_Solarparks_Auswertung.pdf).

4.2.5 Bestäuber-Insekten und Tagfalter

Bestäuber-Insekten

Von "bestäuberfreundlichen" Nutzungsformen in Solarparks profitieren auch naheliegende Landwirtschaftsflächen (Walston et al., 2018). Unter der Annahme einer Bestäuber-Suchdistanz von 1.5 km wurde in den USA über 3'500 km² Agrarland in der Nähe bestehender und geplanter USSE-Anlagen identifiziert, das von einer erhöhten Bestäubungsleistung durch die Schaffung von Bestäuber-Habitaten profitieren könnte.

Graham et al. (2021) überprüften in den USA die Auswirkungen einer 18 ha grossen Solaranlage auf die Pflanzenzusammensetzung, den Blühzeitpunkt und das Nahrungsverhalten von Bestäubern nach der Hauptblütezeit zwischen Juni bis September. Dabei zogen sie folgende Schlussfolgerungen:

- Die Bepflanzung von Solaranlagen mit Pollen und Nektar produzierenden Pflanzen schafft Lebensraum für bestäubende Insekten.
- Die Häufigkeit und Vielfalt an Bestäubern in Plots mit voller Sonneneinstrahlung und im Halbschatten sind ähnlich, bei beiden jedoch grösser als im Vollschatten.
- Der Blühpunkt in den Teilschattenparzellen ist verzögert, was in wasserbegrenzten Ökosystemen von Vorteil sein könnte.
- Solaranlagen sollten mehrere Pflanzenarten enthalten, die schattentolerant sind oder in voller Sonne gedeihen, um die Nischendiversifizierung zu maximieren.
- Es bestehen Synergien zur umliegenden produzierenden Landwirtschaft (Bestäubungsleistungen von Kulturpflanzen).

In einem 39 ha grossen Solarpark mit 76'000 Panels am Rand eines Industrieparks in den Niederlanden wurden 54 Wildbienen- und Schwebfliegen-Arten beobachtet, darunter 5 Vertreter der Roten Liste. Auf besonnten Teilflächen fanden sich mehr Individuen. Die eingebrachten Saatgutmischungen hatten noch keinen signifikanten Einfluss auf die Bestäuber-Fauna, aber dies könnte sich gemäss Autoren im Verlaufe des Monitorings ändern, sofern sich mehr Blütenpflanzen etablieren. Es kamen mehr Bienen vor als in konventionellen Landwirtschaftsflächen, wobei eine hohe Sonneneinstrahlung mit genügend Raum zwischen den Panels, ein permanentes Blütenangebot und ein sachgerechter Unterhalt als entscheidend erachtet werden (Biesmeijer et al., 2020).

Semeraro et al. (2018), die das PV-Potenzial in Apulien (Italien) abschätzten, weisen darauf hin, dass bei geeigneter Ausgestaltung und Pflege die Ökosystemdienstleistungen durch Wiederbelebung der Bestäuber-Fauna gestärkt werden könnten («grüne Infrastruktur»).

In vier britischen Solarparks wurde der Einfluss verschiedener Managementpraktiken auf Hummeln untersucht. Die Vorstudie beruhte auf Quervergleichen von vier Solarparks mit unbebauten Kontrollflächen (Ackerland), die denselben Bewirtschaftungsregimen unterlagen wie die Solarparks vor deren Bau. Zwei Solarparks enthielten Wildblumeneinsaaten und wurden gemäht, die anderen beiden beweidet. Es ergaben sich signifikant höhere Abundanzen von Hummeln in Solaranlagen mit Wildblumenwiesen, nicht jedoch in beweideten Solaranlagen (kleine Stichprobengrösse und somit eher beschränkte Aussagekraft trotz statistischen Tests). Hummeln, die in den Solarparks beobachtet wurden, waren oftmals auf Nahrungssuche, diejenigen auf den Kontrollflächen eher auf der «Durchreise» (Parker & McQueen, 2013).

In USSE-Anlagen auf trockenem Grasland in den USA verdreifachte sich das Ressourcenangebot für Bestäuber-Insekten im Vergleich zur landwirtschaftlichen Nutzung vor dem Bau der Solaranlage (Walston et al., 2021).

Berechnungen zum Lebensraumverlust von Wildbienen in den USA (Bundesstaat Kansas) ergaben, dass Stadterweiterungen weit gravierender zu sein scheinen als die Errichtung von USSE-Anlagen (McCoshum & Geber, 2020).

Blaydes et al. (2021) liefern zehn evidenzbasierte Empfehlungen zur Förderung der Bestäuber-Fauna in Freiflächen-PVA mittels gezieltem Landmanagement, beispielsweise durch Verbesserung von Nahrungs- und Reproduktionsressourcen, Begünstigung der mikroklimatischen Vielfalt, Förderung der Lebensraumheterogenität und Vernetzung mit der umgebenden Landschaft.

Die Standorteignung von Freiflächen-PVA für Honigbienen wurde in einer spanischen Studie bewertet. Zwei grossen USSE-Anlagen (500 MW bzw. 50 MW) beherbergten 270 Bienenstöcke mit rund 13 Mio. Individuen. Daraus ergeben sich Vorteile bei der funktionellen Biodiversität (erhöhtes Potenzial für Bestäubungsleistungen), bei der Vermeidung von Agrochemikalien (dank Viehbeweidung) und auf ökonomischer Ebene durch den Anbau von aromatischen Kräutern zur Verbesserung der Honigqualität (Graham et al., 2021, Sánchez Molina, 2021).

Anlässlich des ersten Weltbientags am 20. Mai 2018 wurden verschiedene Gründe genannt, weshalb Solarparks Honig- und Wildbienen zugutekommen könnten (<https://www.abc-solar.de/unternehmen/presse/presseartikel/news/detail/News/sechs-gruende-warum-solarparks-der-ideale-lebensraum-fuer-bienen-sind>):

- Auf zuvor intensiv bewirtschafteten Flächen können sich Böden zum Teil schon nach kurzer Zeit erholen und die Wiederansiedlung von verschiedenen Tier- und Pflanzenarten ermöglichen.
- In Solarparks werden in der Regel keine Pestizide eingesetzt.
- Bienen, die sich im Solarpark ansiedeln, fliegen auch umliegende Flächen an und bestäuben Kulturpflanzen.

- In Solarparks besteht ein ausreichendes Futterangebot durch unterschiedliche Wildkräuter und Wildblumen
- Solarparks bieten sichere Standorte für Imker und ihre Völker.

Anlässlich des GEO-Tags der Natur vom 12./13. Juni 2021 fanden sich im Solarpark Rickelshausen in Baden-Württemberg 51 verschiedene Wildbienen-Arten, darunter eine stark gefährdete und drei gefährdete Arten (https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Bildergalerien/Geo-Tag_der_Natur/21-10-18_bne_GEO_Tag_der_Natur_-_Solarparks_Auswertung.pdf).

Tagfalter (= tagaktive Schmetterlinge)

Badelt et al. (2020) kommen zum Schluss, dass Freiflächen-PVA im Optimalfall eine ähnliche Tagfalter-Fauna wie extensiv bewirtschaftetes Grünland aufweisen können, wobei letzteres zu den artenreichsten Tagfalter-Habitaten überhaupt gehöre.

In 11 Solarparks im Süden Englands ergab sich ein positiver Zusammenhang zwischen der Häufigkeit von Tagfaltern und dem botanischen Reichtum innerhalb eines Solarparks. Die Pflanzenvielfalt in den Solarparks wurde dabei zum Teil durch die Einsaat von Wildblumenmischungen gefördert. Die Kontrollflächen in der blütenärmeren Umgebung waren meistens signifikant ärmer an Tagfaltern. (Montag et al., 2016).

Erhebungen von Tagfaltern in britischen Solarparks durch Parker & McQueen (2013) erfolgten mit derselben Methodik wie die oben erwähnten Kartierungen von Hummeln. Auch die Resultate waren vergleichbar: Es fanden sich signifikant höhere Individuenzahlen von Tagfaltern in Solaranlagen mit Wildblumenwiesen im Vergleich zu den unbebauten Kontrollflächen (Ackerland). In beweideten Solaranlagen war der positive Effekt hingegen nicht so ausgeprägt.

Ein französischer Solarpark mit einer Fläche von 18 ha in einer ehemaligen Tongrube stellte für mobile Tagfalter kein Wanderhindernis dar, wie Kartierungen im Umfeld des Solarparks auf einer Fläche von 3 x 3 km belegten. Auf sesshafte Tagfalter in der Umgebung hatte der Solarpark keine Auswirkungen, da diese ihre Lebensräume kaum verliessen. Wegen fehlender Einwilligung des Betreibers durften innerhalb des Solarparks leider keine Vergleichserhebungen durchgeführt werden (Guiller et al., 2017).

In fünf deutschen Freiflächen-PVA im Bundesland Bayern mit Flächen zwischen 3 und 12.5 ha wurde die Artenvielfalt von Tagfaltern innerhalb der Solarparks mit derjenigen von Ackerkulturen bzw. intensiv genutztem Grünland verglichen. Dabei resultierte eine deutliche Aufwertung im Vergleich zur vorherigen Intensivnutzung mit Fortpflanzungsnachweisen einiger seltener und bedrohter Arten, z.B. Zahnflügel-Bläuling (*Polyommatus daphnis*), Kleiner Schlehen-Zipfelfalter (*Satyrium acaciae*), Lilagold-Feuerfalter (*Lycaena hippothoe*) und Wegerich-Scheckenfalter (*Melitaea cinxia*). Als besonders vorteilhaft erwiesen sich Hecken im Randbereich oder im näheren Umfeld mit Vorkommen von einheimischen «Schmetterlingsgehölzen», z.B. Schwarzdorn, Rote Heckenkirsche, Kreuzdorn und Faulbaum (Raab, 2015).

Eine Metastudie, basierend auf 75 deutschen Solarparks, fasst die Ergebnisse aus Montag et al. (2016) und Parker & McQueen (2013) zusammen und ergänzt sie mit den Ergebnissen aus Gutachten von drei Solarparks im Bundesland Brandenburg (Peschel et al., 2019). Dort wurden zwischen 2012 und 2016 insgesamt 44 Tagfalter-Arten nachgewiesen, was rund 40 % aller nachgewiesenen Arten des Bundeslands

Brandenburg entspricht, darunter etwa auch der in Deutschland stark gefährdete Violette Feuerfalter (*Lycæna alciphron*). Die Autoren beurteilen besonnte Streifen von mindestens 3 m Breite als besonders positiv. Auf diese Weise könne die Tagfalter-Diversität erheblich erhöht werden. Sie weisen aber auch auf den noch bestehenden Forschungsbedarf zu diesem Thema hin (Peschel et al., 2019).

4.2.6 Andere Wirbellosen-Gruppen inkl. Mikroorganismen

Terrestrische Wirbellose

Je nach Wirbellosen-Gruppe sind durch die Erstellung und den Betrieb von Freiflächen-PVA positive oder negative Effekte zu erwarten. Wirbellose dürften sogar noch stärker von der Nutzungsform abhängig sein als viele Wirbeltiere, vor allem von den Mahd- und Beweidungszeitpunkten (Fartmann, Jedicke, Streitberger, & Stuhldreher, 2021). Positive Auswirkungen auf Heuschrecken, Tagfalter, Spinnen und Laufkäfer sind dann zu erwarten, wenn die Fläche zuvor ackerbaulich genutzt wurde und dann in Kombination mit der Freiflächen-PVA neu als extensives Grünland bewirtschaftet wird (evtl. mit begleitender Einsaat, bestehend aus regionalem Blumenwiesen-Saatgut). Negative Effekte dürften sich primär dann ergeben, wenn eine Freiflächen-PVA auf zuvor bereits extensiv genutztem Grünland, wie etwa auf einem Magerrasen, erstellt wird, was zu einer Beeinträchtigung der bestehenden, vielfältigen Wirbellosen-Fauna führen kann (Demuth et al., 2019).

Bei der naturschutzfachlichen Bewertung von Solarparks weisen auch Herden et al. (2009) darauf hin, dass verallgemeinernde Aussagen zu den einzelnen Umweltwirkungen auf die Wirbellosen-Fauna nur eingeschränkt möglich und deshalb individuelle Beurteilungsverfahren notwendig seien. Sie sind jedoch der Ansicht, dass dank der teilweisen Beschattung durch die Solarpanels ein kleinräumiges Nebeneinander von verschiedensten Lebensräumen entstehen kann, welches dank unterschiedlichen Mikroklimata mehr Arten Platz bietet als uniforme Lebensräume. Herden et al. (2009) weisen in diesem Zusammenhang darauf hin, dass viele Heuschrecken die stärker besonnten Stellen zwischen den Panel-Reihen bevorzugen würden. So fand sich 2021 im bayerischen Solarpark Ohling die in Bayern als gefährdet eingestufte Blauflügelige Ödlandschrecke (*Sphingonotus caeruleus*) (https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Bildergalerien/Geo-Tag_der_Natur/21-10-18_bne_GEO_Tag_der_Natur_-_Solarparks_Auswertung.pdf).

Für Heuschrecken, auch bedrohte Arten, ergab sich durch den Betrieb von Solarparks eine Aufwertung im Vergleich zur vorherigen Acker- oder Intensiv-Grünlandnutzung. 18 verschiedene Arten konnten in 5 USSE-Anlagen in Deutschland (Fläche zwischen 3 und 12.5 ha) nachgewiesen werden, darunter Feldgrille (*Gryllus campestris*), Gestreifte Zartschrecke (*Leptophyes punctatissima*), Sumpfschrecke (*Stethophyma grossum*) und Heidegrashüpfer (*Stenobothrus lineatus*) (Raab, 2015).

In städtischen Gebieten können mit PV-Panels überdeckte Parkplätze die Artenvielfalt und Abundanz von Arthropoden fördern. In den USA zeigte sich in zwei kalifornischen Städten, dass die Anzahl der Arthropoden-Familien und deren Individuenzahlen auf begrüntem «Solar Carports» besonders hoch waren (Armstrong, Ostle, & Whitaker, 2016).

Beleuchtete USSE-Anlagen können nachts Insekten anlocken, die dann um die Lichtquellen schwirren und an diesen verenden (Owens et al., 2020).

Bei einer fest installierten Solaranlage in Chile wurden mehr Veränderungen der Artenzusammensetzung von Arthropoden festgestellt als bei einer nachgeführten Anlage (Suuronen et al., 2017).

Da nur spärliche Informationen zur Wirbellosen-Fauna von Freiflächen-PVA vorliegen, sei an dieser Stelle eine israelische Studie zu PVA auf Flachdächern erwähnt. Hier wurde die Wirbellosenfauna von begrünten, nicht bewässerten Dächern mit und ohne PV-Panels verglichen und in Bezug zu nicht begrünten Dächern mit PV-Panels gesetzt. Interessanterweise unterschied sich die Abundanz der verschiedenen einbezogenen Wirbellosen-Gruppen (z.B. Käfer, Zweiflügler, Wespen, Ameisen, Schmetterlinge) nicht zwischen den drei Dachtypen. Die PV-Panels hatten auch keinen wesentlichen Einfluss auf den Artenreichtum insgesamt, zeigten aber v.a. im Sommer einen leicht negativen Effekt (Schindler et al., 2018).

Aquatische Wirbellose

PV-Panels können horizontal polarisiertes Licht so stark reflektieren, dass sie für bestimmte wassergebundene Gliederfüssler wie Wasserflächen erscheinen und sie zur Eiablage auf den Panels verleiten («ökologische Fallen») (Horváth et al., 2010). Bei bestimmten Einfallswinkeln reflektieren Panels das Licht fast vollständig (Polarisationsgrad $d \approx 100\%$) und übertreffen die typischen Polarisationswerte für Wasser ($d \approx 30-70\%$) deutlich (Horváth et al., 2010). Matte Antireflexionsbeschichtungen (ARB) können bei sachgerechter Anwendung diesen negativen Effekt auf einzelne Wasserinsektengruppen vermindern. Der Effekt von ARB erwies sich in einer ungarischen Untersuchung bei Bremsen als am deutlichsten, bei Zuckmücken als eher indifferent, bei Eintagsfliegen jedoch als negativ. Bei bedecktem Himmel gab es vermehrt Eiablagen auf den Panels, z.B. durch Eintagsfliegen. Die Autoren empfehlen generell, auf PVA in Gewässernähe zu verzichten (Száz et al., 2016). Auch Günnewig et al. (2007) äussern die Befürchtung, dass flugfähige Wasserinsekten durch PV-Module angelockt werden könnten.

PV-Panels mit weisser Rückseitenfolie waren 10 bis 26x weniger attraktiv für Wasserinsekten als Panels ohne weisse Streifen zwischen den Solarzellen (Horváth et al., 2010).

Dass glatte und glänzende Oberflächen in Wassernähe eine Attraktionswirkung auf polarotaktische Wasserinsekten und ihre Fressfeinde ausüben, bestätigte sich bei einer Untersuchung an Glasfassaden in Ungarn (Perezslényi, Horváth, & Kriska, 2017).

Horváth et al. (2020) überprüften auf einem ungarischen Pferdehof, welchen Effekt schwarz glänzende PVA-Oberflächen auf Bremsen in Abhängigkeit des Lichteinfallswinkels ausüben. Die Gesamtzahl der Bremsen war am höchsten bei horizontaler Oberfläche, am tiefsten bei einem Neigungswinkel von 75 Grad, wobei die Verweildauer auf der schwarz glänzenden horizontalen Oberfläche mit steigenden Temperaturen abnahm. Dunkle PV-Panels erreichten in Ungarn Temperaturen von über 55 °C (Horváth et al., 2020).

Einen innovativen Ansatz wählten Fritz et al. (2020), indem sie den Einfluss von bioreplizierten PV-Beschichtungen (analog der Oberflächenmikrotextur von Rosenblättern) auf das Eiablageverhalten von Bremsen und Eintagsfliegen überprüften. Die bioreplizierten PV-Beschichtungen erwiesen sich für die untersuchten Arten als unattraktiv, was auf eine reduzierte polarisierte Lichtverschmutzung hindeutet.

Anhand von zwei marinen Kleinkrebs-Arten und einer Seeigel-Art wurde die Toxizität von PV-Panels der älteren Generation ermittelt. Dazu wurden die 21-jährigen, monokristallinen PV-Panels mechanisch in Kleinststücke zerlegt. Die Freisetzung an Elektrolyten (Natrium, Calcium und Magnesium) ergab eine Konzentration unterhalb des akzeptierten maximalen Schadstoffgehalts, die Nickel-Freisetzung war in einer potenziell toxischen Konzentration. Dies führte zu einer höheren Mortalität bei der Kleinkrebs-Art *Daphnia magna* sowie zu Entwicklungsstörungen beim Salinenkreb (Artemia salina) und bei der Seeigel-Art *Paracentrotus lividus* (Motta et al., 2016).

Mikroorganismen

Tanner et al. (2020) untersuchten mikrobielle Bakterien und Pilze auf PV-Panels. Sie beobachteten im Jahresverlauf eine tendenzielle Zunahme von spezialisierten Vertretern. Die unspezialisierten, generalistischen Taxa nahmen hingegen im Jahresverlauf ab.

Bei der Evaluation der Toxizität von organisch-anorganischen Perowskit-Solarzellen auf Mikroorganismen zeigten verschiedene Arten vergleichbare Reaktionen (Wang et al., 2020). Die Bakterien-Art *Vibrio fischeri* wird als besonders geeigneter Indikator bezeichnet, da sie im Vergleich zu den anderen getesteten Organismen eine höhere Sensitivität, geringe Kosten und einen relativ hohen Durchsatz aufweisen soll.

4.3 Auswirkungen auf die Vegetation

Das Konfliktpotenzial zwischen Pflanzenvielfalt und Freiflächen-PVA hängt massgeblich von der Wertigkeit der in Anspruch genommenen Flächen ab. Bei bestehender artenreicher Flora, so wie sie etwa in vielen Magerwiesen (z.B. blütenreiche Glatthaferwiesen, Halbtrockenrasen) und -weiden vorkommt, ergeben sich vor allem Konflikte durch direkten Flächenverlust während der Bautätigkeit, durch Veränderung der Bodenstruktur, durch Beschattung heliophiler Arten sowie durch die Überschirmung von Flächen, was wiederum zu veränderten Niederschlagsmengen unter den Modulen führt (vgl. Kap. 4.4.1) (Demuth et al., 2019). Andererseits sind durch Umwandlung von zuvor intensiv genutzten Ackerflächen in extensiv genutztes Grünland deutliche Lebensraumaufwertungen für die Flora innerhalb von Freiflächen-PVA möglich (Herden et al., 2009).

Die Beschattung durch PV-Panels beeinflusst die Vegetation vor allem hinsichtlich Wuchshöhe, Blühhäufigkeit und Deckungsgrad der vorhandenen Pflanzen, wobei ab einem Bodenabstand von mehr als 0.8 m genügend Streulicht für die pflanzliche Primärproduktion auf dem Boden ankommen soll (Kitt, 2020).

Artspezifische Vegetationskartierungen von Solarparks liegen nur spärlich vor. In fünf deutschen Freiflächen-PVA (Bundesland Bayern) mit Flächen zwischen 3-12.5 ha wurde die Artenvielfalt und -veränderung der Flora im Vergleich zur vorherigen Acker- oder Intensiv-Grünlandnutzung ermittelt. Die Artenvielfalt war dabei sehr unterschiedlich auf die Probestellen verteilt. Insgesamt beurteilten die Autoren die Wertigkeit der zwischen 2001 und 2010 erstellten Solarparks aus floristischer Sicht als noch relativ gering, obschon immerhin 231 Pflanzenarten nachgewiesen werden konnten, davon 10 Arten der Roten Liste Bayerns. Die Arten der Roten Liste waren oft nur randlich vorzufinden, was auf eine allmähliche Einwanderung hindeutet. Eine hohe Vielfalt ergab sich z.B. durch Steinschüttungen mit Pioniervegetation (Raab, 2015).

In 11 Solarparks im Süden Grossbritanniens wurde der Einfluss von Managementpraktiken auf die Vegetation bewertet. Solarparks wurden mit unbebauten Kontrollflächen verglichen, welche demselben Bewirtschaftungsregime unterlagen wie die Solarparks vor deren Bau. Die Solarparks wiesen eine signifikant höhere Artenvielfalt auf als die Kontrollflächen, v.a. zurückzuführen auf die Einsaat von Wildblumen und den (höchstens) limitierten Herbizideinsatz. Es wurde kein signifikanter Unterschied zwischen der Pflanzenvielfalt unter den PV-Panels und zwischen den Reihen festgestellt, die Artenzusammensetzung war jedoch verschieden (Montag et al., 2016).

In einer 2.8 ha grossen USSE-Anlage in den USA ermittelten Beatty, Macknick, McCall, Braus, & Buckner (2017) die Vegetationszusammensetzung unter Einbezug verschiedener Saatgutmischungen und Beschattungseffekte. Die Vegetationsdecke wurde während des Baus vollständig entfernt und dann wiederbegrünt. Dabei zeigte sich, dass niedrig wachsende Gräser (mit oder ohne schattentolerante Arten) und Leguminosen innerhalb von drei Jahren eine umfangreiche neue Pflanzendecke bilden können. Die Bedingungen für das Pflanzenwachstum seien dank des Nachführmechanismus der Süd-Nord ausgerichteten Panels vermutlich besser als bei fixen USSE-Anlagen ohne Nachführmechanismus, die in Ost-West-Richtung verlaufen.

In einem tschechischen Forschungsprojekt wurden in einer 3.7 ha grossen Solaranlage die Pflanzengesellschaften zwischen und unter PV-Panels aufgenommen. Es handelte sich um eine Ruderalfläche, die mit einer Grasmischung angesät wurde. Die Bedingungen für artenreiche Pflanzengemeinschaften werden als günstig taxiert, falls eine regelmässige Mahd stattfindet. Niedrig wachsende Pflanzen würden einen guten Erosionsschutz bieten. Zwischen den PV-Panels seien mehrjährige Gräser und Kräuter empfehlenswert, unter den PV-Panels v.a. mehrjährige Kräuter (Uldrijan, Kováčiková, Jakimiuk, Vaverková, & Winkler, 2021).

Am Rande eines 39 ha grossen Solarparks in den Niederlanden zeigten sich zwischen Ende April und Anfang August 2019 103 blühende Pflanzen-Arten. Der Erfolg von fünf verschiedenen Ansaat-Mischungen auf den Blütenreichtum soll in einem weiterführenden Monitoring genauer untersucht werden, da die Etablierung Zeit benötige (Biesmeijer et al., 2020).

Die Umzäunung von Freiflächen-PVA könnte wegen geringeren Störungen einen positiven Effekt auf die Vegetationsentwicklung ausüben. Diese Aussage stützt sich aber nur auf eine persönliche, nicht wissenschaftlich erhärtete Einschätzung durch Bruce (2019) aus einer umzäunten USSE-Anlage in den USA.

In einer spanischen Freiflächen-PVA ermittelten Pérez-de-los-Reyes et al. (2013) das Wachstum von bodendeckenden Pflanzen unter PV-Panels. Nur zwei von acht Arten, die unter den PV-Panels gepflanzt wurden, hatten einen Überlebensprozentsatz von über 50 %, nämlich die Montpellier-Zistrose (*Cistus monspeliensis*) mit 62.5 % und die Schmalblättrige Steinlinde (*Phillyrea angustifolia*) mit 97.9 %.

Dhar et al. (2020) weisen in ihrer Metastudie darauf hin, dass Solarparks durch anthropogene Veränderungen und Störungen evtl. anfälliger für das Aufkommen exotischer Arten, z.B. unerwünschter Neophyten, sein könnten. Die Erholung der Vegetation könne länger dauern als in naturnahen Ökosystemen.

Diese Ansicht wird durch Moore-O'Leary et al. (2017) gestützt. Sie weisen zudem darauf hin, dass standortgebundene Arten «stabiler» Lebensräume, die vor dem Bau einer USSE-Anlage vorhanden waren, evtl. das Nachsehen haben, besonders dann, wenn Umsiedlungsbemühungen fruchtlos bleiben.

Der Einfluss von Beschattung und Substratmächtigkeit auf die Pflanzenvielfalt begrünter Dächer wurde in den Niederlanden untersucht (van der Kolk, van den Berg, Korthals, & Bezemer, 2020). Eine grössere Substratmächtigkeit und eine stärkere Beschattung erhöhten additiv die floristische Vielfalt. Die erwünschte Beschattung könnte durch eine Überdeckung mit PV-Panels erzielt werden. Ein Vegetationsvergleich zwischen begrünten Dächern mit und ohne PV-Panels in Israel ergab keinen eindeutigen Effekt auf die Pflanzenarten-Vielfalt insgesamt, jedoch wurden verlängerte Blühzeiten bei einjährigen Pflanzen und ein stärkeres Wachstum von Mauerpfeffer (*Sedum*) auf Dächern mit PV-Panels festgestellt (Schindler et al., 2018). Die Schlussfolgerungen der Autoren beziehen sich auf Flachdächer, liefern aber auch Hinweise auf die Ausgestaltung von Freiflächen-PVA zugunsten einer möglichst hohen floristischen Vielfalt, was auch Bestäuber-Insekten zugutekommen dürfte (vgl. Kap. 4.2.5).

4.4 Auswirkungen auf abiotische Umweltfaktoren

4.4.1 Bodeneigenschaften und -funktionen

Mikroklimatische Einflüsse auf den Boden sind für Solaranlagen weit weniger gut dokumentiert als für Windkraftwerke (Agha et al., 2020). Die Autoren erwähnen, dass Anlagen für erneuerbare Energien allgemein das Potenzial haben, den Kohlenstoffkreislauf zwischen Pflanzen und Boden durch Veränderungen des Mikroklimas in Bodennähe zu verändern.

Mit Bezug auf Deutschland stellen Badelt et al. (2020) fest, dass bisher kaum Informationen vorliegen, wie sich Freiflächen-PVA auf das Sickerverhalten, den Bodenwasserhaushalt und damit die Grundwasserneubildung auswirken. In ihrer Dissertation gelangte Makaronidou (2020) ebenfalls zur Schlussfolgerung, dass die Auswirkungen von Solarparks auf das lokale Klima und die Ökosystemfunktionen generell nur unzureichend geklärt seien. Ihre eigenen Messungen auf einer britischen Freiflächen-PVA während der Vegetationsperiode ergaben auf Grasland kühlere Bodentemperaturen und eine höhere Bodenfeuchtigkeit unter den Panels im Vergleich zu den Lücken zwischen den Panelreihen. Ein solcher «Cooling-Effekt» der Substratoberfläche direkt unter den PV-Panels wurde auch durch Schindler et al. (2018) festgestellt.

In 30 USSE-Anlagen mit einer Leistung von mindestens je 1 MW wurden die potenziellen Ökosystemleistungen untersucht. Im Vergleich zur landwirtschaftlichen Nutzung vor dem Bau der Solaranlagen führte die Wiederherstellung der natürlicher Grünlandvegetation innerhalb der Anlagen zu einer Steigerung des Kohlenstoffspeicherungspotenzials um 65 %. Die Zunahme des Sediment- und Wasserrückhaltevermögens betrug über 95 % bzw. 19 % (Walston et al., 2021).

In einem Forschungsprojekt auf nicht bewässerten Schafweiden mit Wasserstress in den USA wiesen Böden direkt unterhalb der PV-Panels höhere Feuchtigkeitswerte auf und waren signifikant wassersparender (328 % effizienter) als vergleichbar beweidete Referenzböden ausserhalb der Solaranlage (Elnaz Hassan-

pour Adeg, Selker, & Higgins, 2018). Eine ausgeprägtere Heterogenität der Substratfeuchte bei Vorhandensein von PV-Panels erwähnen auch Schindler et al. (2018), jedoch war bei ihnen keine höhere durchschnittliche Substratfeuchte zu verzeichnen.

Schatten unter den PV-Panels kann die Albedo der Umgebung erhöhen, was lokale Temperatur- und Niederschlagsmuster durch Modifizierung der Windgeschwindigkeit und Evapotranspiration verändern kann. Das Ausmass hängt von lokalen Bedingungen und der Grösse der Solaranlage ab (Dhar et al., 2020). Badelt et al. (2020) weisen auf eine höhere Evapotranspiration in den feuchteren Randbereichen der Module und auf eine verminderte Evapotranspiration unter den Modulen hin. Da die Randbereiche der PV-Module stärkeren Regeneinflüssen unterliegen (Abtropfbereich), könne es dort bei Starkniederschlägen zu Boden-erosion kommen. In den tieferen Bodenschichten gleiche sich die Wasserverteilung allmählich wieder an, wobei grössere Modulabstände zum Boden einer unregelmässigen Verteilung der Niederschläge entgegenwirken und zu mehr pflanzenverfügbarem Wasser unter den Modulen führen würden (Badelt et al., 2020; Elamri, Cheviron, Lopez, Dejean, & Belaud, 2018).

Während Solarmodule gemäss Cook Lauren M. & McCuen Richard H. (2013) selbst keinen signifikanten Einfluss auf Wasser-Abflussmengen oder auf Spitzenwerte haben, kann sich der Spitzenabfluss bei verdichteten Böden unter und zwischen den PV-Panels erhöhen. Deshalb seien sachgemäss gepflegte Grünflächen in Solarparks von zentraler Bedeutung.

In einer USSE-Anlage in den USA erfolgte während des Baus ein Abtrag der Vegetationsdecke mit anschliessender Wiederbegrünung. Sieben Jahre nach der Begrünung waren die Kohlenstoff- und Stickstoff-Konzentrationen in den Böden tiefer als in den Referenzböden ausserhalb der Anlage. Die PV-Module förderten die Heterogenität in der Verteilung der Bodenfeuchtigkeit, da sich der Niederschlag entlang der unteren PV-Modulränder ansammelte. Die Modulanordnung könnte in Verbindung mit Bepflanzungsstrategien dazu genutzt werden, das Pflanzenwachstum zu maximieren oder die Bodenerosion zu minimieren (Choi et al., 2020).

In einem neu entwickelten, innovativen Umsetzungsbeispiel beschreiben George, Kanavas, & Zissopoulos (2013), wie Regenwasser an der Unterkante von PV-Panels gesammelt und in einem Tank gespeichert werden kann. Mit diesem Wasser kann man anschliessend Böden für die landwirtschaftliche Produktion bewässern, Wasser vor Ort sammeln oder für andere Zwecke ableiten. Es ist aber auch möglich, die PV-Panels mit dem gesammelten Wasser zu kühlen oder damit die Panel-Oberflächen zu reinigen.

Beim Bau von Kabelgräben kommt es zu Bodenumlagerungen und gegebenenfalls Bodenvermischungen, was unter Umständen eine Zerstörung der vorhandenen Bodenstruktur bedeuten kann (Günnewig et al., 2007).

4.4.2 Kontamination von Böden und Wasser

Die Gefahr einer Bodenkontamination durch PVA mit Blei oder Cadmium wird bei intakten Solarmodulen als sehr gering eingestuft. Sind Halbleiterschicht, Kontakte oder Lötstellen aufgrund von Beschädigungen durch Hagel oder Brand der Witterung ausgesetzt, ist jedoch eine Auslaugung von Blei oder Cadmium

denkbar. Deshalb müssen defekte Modulteile im Sinne des präventiven Bodenschutzes aus der Anlage entfernt werden (AL-agele, Proctor, Murthy, & Higgins, 2021).

Eine Kontamination mit Schadstoffen aus verzinkten Modulhalterungen und -tragkonstruktionen ist gemäss Badelt et al., (2020) zwar denkbar, aber es gebe dazu bisher keine Literaturhinweise. Falls die Stahlkonstruktion bis in den Grundwasser-Schwankungsbereich reichen würde, sei jedoch eine Beeinflussung des Grundwassers möglich. Trotzdem stufen Badelt et al. (2020) die betriebsbedingten Auswirkungen von Freiflächen-PVA auf den Boden und den Wasserhaushalt im Allgemeinen als unerheblich ein.

Böden in der Nähe chinesischer Freiflächen-PVA zeigten erhöhte Fluorid- und Chlorid-Belastungen (Wu et al., 2016). Trotzdem stellten die Autoren vielfältige Mikroorganismen-Gemeinschaften fest und vermuten, dass diese wahrscheinlich gegen hohe Fluorid- und Chlorid-Konzentrationen resistent seien.

Tamaro et al. (2016) eruierten die potenzielle Umweltgefährdung durch PV-Panels, die in den letzten 30 Jahren in Italien eingesetzt wurden. Freisetzbare Mengen einiger gefährlicher Metalle (Blei, Chrom, Cadmium, Nickel) zeigten z.T. eine Überschreitung der gesetzlichen italienischen und europäischen Grenzwerte für Boden und Wasser.

Bei der ökologisch-energetischen Bilanzierung einer polnischen PVA werden Silber, Nickel, Kupfer, PA6, Blei und Cadmium als besonders problematisch für Gesundheit und Umwelt bezeichnet (Piasecka, Bałdowska-Witos, Piotrowska, & Tomporowski, 2020).

Versuche zu den Auswirkungen von freigesetzten Schwermetallen aus Perowskit-Solarzellen auf den Zebrafisch (*Danio rerio*) zeigten einen unerwarteten Vergiftungsweg in Form von Versauerung. Auf Zinn basierte Perowskite sind demnach vermutlich nicht das ideale Blei-Surrogat (Babayigit et al., 2016).

In der Schweiz sind jedoch kaum Solarmodule mit Cadmium und Nickel auf dem Markt und Module auf Siliziumbasis enthalten kein Cadmium und Nickel. Perowskit-Module kommen bisher nicht serienmässig zum Einsatz (Auskunft David Stickerberger, *Swissolar*, vom 11.10.2021 und Jürg Rohrer, ZHAW, vom 21.10.2021).

4.4.3 Lufttemperatur und -feuchtigkeit

Makaronidou (2020) ermittelte in einer britischen Freiflächen-PVA kühlere Lufttemperaturen unter den Panels während der Vegetationsperiode im Vergleich zu Messungen zwischen den Panelreihen.

In einem rund 12 ha umfassenden Solarpark in Grossbritannien erfolgten Messungen der Lufttemperatur und -feuchtigkeit unter PV-Panels. Im Sommer ergab sich eine Abkühlung von bis zu 5.2 °C und eine stärkere Austrocknung unter den Panels im Vergleich zu den Lücken- und Kontrollflächen. Die Lücken zwischen den Panels waren im Winter um bis zu 1.7 °C kühler als die Flächen direkt unter den Panels bzw. als die Kontrollflächen ausserhalb der Anlage (Armstrong et al., 2016).

In einer kleinflächigen Agro-Photovoltaik-Anlage von 0.3 ha in Deutschland waren bezüglich Lufttemperatur und -feuchtigkeit keine relevanten Unterschiede zur externen Referenzfläche feststellbar. Dies könnte

damit zusammenhängen, dass die Solarmodule, wie bei APV-Anlagen üblich (vgl. Kap. 4.5), ca. 6 m oberhalb der Bodenoberfläche montiert waren und dadurch eine bessere Durchlüftung unter den Panels gewährleisten konnten (Weselek, Ehmann, Zikeli, Lewandowski, & Högy, 2019).

Die Temperaturen über USSE-Anlagen waren in einem semiariden Gebiet in den USA nachts regelmässig 3-4 °C höher als in der freien Natur (Barron-Gafford et al., 2016). Ein vergleichbarer Wärmeinsel-Effekt ergab sich auch bei Messungen in Deutschland, mit Nachttemperaturen von "einigen Grad" über der Umgebungstemperatur. Dies könnte Frostschäden vorbeugen, andererseits aber aus naturschutzfachlicher Sicht auch einen Konflikt mit sich bringen, falls die Anlagen auf Flächen errichtet werden, auf denen aktuell Kaltluft mit klimatischer Ausgleichsfunktion produziert wird (Günnewig et al., 2007).

4.5 Agro-Photovoltaik (APV)

4.5.1 Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion

Allgemeine Bewertung

APV wird von verschiedenen Autoren als geeignete und zukunftssträchtige Ergänzung zur konventionell produzierenden Landwirtschaft betrachtet (u.a. AL-agele et al., 2021; Barron-Gafford et al., 2019; ISE, 2020; Maia et al., 2020; Marrou et al., 2013; Photovoltaic Austria, 2020; Rösch, 2016; Weselek et al., 2019). Durch kombinierte Energie- und Pflanzenproduktion kann APV die Produktivität einer Landwirtschaftsfläche um bis zu 70 % steigern (Weselek et al., 2019). Die Harmonisierung von Energieerzeugung, Landwirtschaft und verbesserten Ökosystemleistungen ist essenziell (Semeraro et al., 2018) und das Potenzial scheint unerschöpflich: global betrachtet könnte der gesamte Energiebedarf der Menschheit mit APV auf knapp 1 % der Ackerfläche gedeckt werden (Elnaz Hassanpour Adeh et al., 2018). Miskin et al. (2019) erachten das globale Potenzial der APV als ausreichend für die Energieversorgung von mehr als 10 Milliarden Menschen.

In einem Review zum Stand der Technik, den mikroklimatische Veränderungen und den Auswirkungen von APV-Anlagen auf die landwirtschaftliche Produktion kommen Weselek, Ehmann, Zikeli, et al. (2019) zusammenfassend zu folgenden Schlussfolgerungen: Der Anbau von Nutzpflanzen unter APV-Anlagen kann zu sinkenden Ernteerträgen führen, da die Sonneneinstrahlung unter den Panels um etwa ein Drittel reduziert sein dürfte. Demgegenüber seien potenzielle Vorteile für die Pflanzenproduktion dank zusätzlicher Beschattung und beobachteter Verbesserungen der Wasserproduktivität zu beobachten (Abfederung Klimawandel). Barron-Gafford et al. (2019) weisen in einem integrativen Ansatz auf mehrere additive und synergetische Vorteile der Beschattung hin, einschliesslich reduziertem Trocken- und Hitzestress der Pflanzen sowie verbesserter Nahrungsmittelproduktion.

Ackerland zeigte in den USA mit einem Median von ca. 28 W pro m² das grösste Solarpotenzial unter den Landwirtschaftsflächen (Elnaz H. Adeh, Good, Calaf, & Higgins, 2019).

Da Solarpanels meistens in 3-6 m Höhe errichtet werden, bleibt die Fläche darunter, mit Ausnahme der Stützen, weiterhin für die landwirtschaftliche Nutzung verfügbar. Betriebe können auf zwei Etagen ernten

und dank dieser Doppelnutzung ein Zusatzeinkommen als «Energiewirte» generieren. Landwirte können aber auch «Energieflächen» verpachten oder Energiegemeinschaften mit anderen Betrieben eingehen (Photovoltaic Austria, 2020). Die APV-Unterkonstruktion könnte gleichzeitig auch für Schutznetze oder -folien verwendet werden (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020).

Wenn der Abstand der Stützen so gewählt wird, dass er einem Vielfachen der Breite einer gängigen Landmaschine entspricht, bleiben mehr als 95 % der Fläche weiterhin landwirtschaftlich nutzbar und mit Traktoren befahrbar (Photovoltaic Austria, 2020). Da die Stützen in Reihenform angelegt sind, ergibt sich jedoch in Kombination mit dem Ackerbau trotzdem der Nachteil, dass ein rund 0.5 - 1 m breiter Saum entsteht, der nicht bewirtschaftet werden kann (Badelt et al., 2020).

Das österreichische PV-Unternehmen *Eco-Tec* kooperiert mit dem Start-up *Meine Blumenwiese*, um Standorte von Freiflächen-PVA ökologisch aufzuwerten. Dabei werden schon in der Projektierungsphase Blumenwiesen mit einheimischen Wildpflanzen angelegt, die dann Insekten und vielen anderen Wildtieren einen neuen Lebensraum bieten (<https://www.pv-magazine.de/2020/08/28/photovoltaik-kraftwerke-er-moeglichen-artenreichen-lebensraum>).

Auswirkungen auf die pflanzliche Produktion

Modellberechnungen aus Frankreich ergaben im Optimalfall eine Steigerung der Produktivität in APV-Anlagen um bis zu 60-70 % (Dupraz et al., 2011).

Ein Feldexperiment in Süddeutschland ermittelte die Unterschiede zwischen APV und Referenzflächen ohne APV bei den Kultursorten Knollensellerie, Winterweizen, Kartoffeln und Klee gras. Dabei ergaben sich folgende Resultate (Weselek et al., 2021):

- Die photosynthetisch aktive Strahlung war unter APV um ca. 30 % verringert.
- Während des Sommers waren die Bodentemperaturen unter APV tiefer.
- Die Bodenfeuchte und Lufttemperatur unter APV waren generell tiefer.
- Erträge im Vergleich zu Referenzstandort: -19 bis +3 % für Winterweizen, -20 bis +11 % für Kartoffeln und -8 bis -5 % für Grasklee.
- Im heissen, trockenen Sommer 2018 konnten die Erträge von Winterweizen und Kartoffeln durch APV um 2.7 % bzw. 11 % gesteigert werden.

Bei der pflanzlichen Produktion verringert die Beschattung v.a. bei schnell bodendeckenden Kulturen die Bodenverdunstung, steigert die Biomasse und dadurch auch den landwirtschaftlichen Ertrag. Wenn das verfügbare Licht unter einer APV-Anlage noch 50-70 % der vollen Sonneneinstrahlung beträgt, wird die Evatranspiration von Kulturpflanzen um 10-30 % reduziert (Marrou et al., 2013), was gerade im Kontext mit dem Klimawandel zunehmend von Vorteil für die landwirtschaftliche Produktion sein dürfte. Auch Dupraz et al. (2011) erwähnen einen möglichen Schutz vor den Auswirkungen des Klimawandels durch APV, z.B. vor Hagel und Überhitzung.

In ihrem kurzen Review über die Auswirkungen der APV-Beschattung auf Nutzpflanzen kommen Touil et al. (2021) zum Schluss, dass die Beschattungsintensität von zentraler Bedeutung für die Produktion ist.

Während bei einem APV-Deckungsgrad von weniger als 25 % kein hemmender Einfluss auf das Pflanzenwachstum festzustellen war, ergab sich ein negativer Effekt bei Deckungsgraden von 50-100 %, ausser bei ausgewählten Kulturen wie Erdbeeren und Spinat.

Auf einer deutschen APV-Anlage, die mit Solarpanels auf ca. 6 m Höhe über Winterweizen und Klee gras bestückt war (30 % Deckung durch Panels), untersuchten Weselek et al. (2019) in einem einjährigen Versuch die Ertragsveränderungen. Beim Klee gras resultierten nur geringe Ertragseinbussen bei der Gesamt trockenmasse von 5.3 %, beim Winterweizen betrug der Rückgang 18.7 %. Der volumetrische Wassergehalt des Bodens auf der mit PV-Panels bestückten Fläche war im Vergleich zur Referenzfläche beim Weizen leicht erhöht (4.1 %) und beim Klee gras reduziert (-6.4 %). Die Bodentemperatur auf der Referenzfläche war geringfügig höher (6.1 % bzw. 8.9 %).

Auf einer französischen APV-Anlage, welche auf 4 m Höhe erstellt wurde und vier Salatsorten überdeckte, wurden in einem zweijährigen Versuch die Auswirkungen der unterschiedlichen Beschattungsintensität auf den Ernteertrag überprüft (50 % bzw. 70 % der einfallenden Strahlung). Dabei ergab sich bei einer geringeren Sonneneinstrahlung von 50 % ein Salatertrag, der gleich oder höher ausfiel als gemäss Berechnung zu erwarten gewesen wäre. Die Autoren postulieren, dass der Salatertrag dank einer verbesserten *Radiation Interception Efficiency* im Schatten aufrecht erhalten werden kann, da Salat im Schatten grössere Blätter bildet (Marrou et al., 2013).

Die bisherigen Untersuchungen lassen tendenziell den Schluss zu, dass schattenliebende Kulturen wie etwa Salat von der Beschattung durch APV profitieren, der Ertrag von lichtliebenden Pflanzenarten wie etwa Weizen hingegen eher sinkt (Rösch, 2016). Photovoltaic Austria (2020) bezeichnet Kartoffeln, Hopfen, Spinat, Salat, Ackerbohnen und Leguminosen als landwirtschaftliche Kulturen, die von der APV profitieren könnten. Vergleichbare Erträge sollen bei Roggen, Gerste, Raps, Erbsen, Spargel, Karotte, Kohl, Rettich und Tabak resultieren. Einen eher negativen Effekt soll sich bei Weizen, Dinkel, Mais, Speisekürbis, Wein, Obstkulturen, Sonnenblumen, Erdbeeren, Kohl und Hirse ergeben. BenGhida & BenGhida (2019) nennen in diesem Zusammenhang Kartoffeln, Spinat, Salate und Bohnen als schattentolerante, «APV-fähige» Kulturpflanzen.

Dass andererseits auch traditionell als schattenintolerant geltende Kulturpflanzen in sonnigeren Zwischenräumen von APV-Anlagen gut gedeihen können, zeigen Messungen an Tomatenpflanzen mit zwei verschiedenen Bewässerungsbehandlungen (voll und defizitär) in den USA (Solarpanels in 3 m Höhe). Die Produktivität zwischen den Panelreihen war bei Wasserdefizit höher als in den Kontrollflächen ohne PV-Panels (Al-agele et al., 2021). Vergleichbare Schlussfolgerungen lassen sich auch aus einem Experiment in einer deutschen APV-Anlage ziehen, in welchem Kartoffeln, Knollensellerie, Klee gras und Winterweizen angebaut wurden (Solarpanels in 5.5 – 8 m Höhe) (Trommsdorff et al., 2021). Die Flächenproduktivität war 2017 unter den APV-Panels um 56-70 % höher als auf der Referenzfläche, im trockenen Hitzesommer 2018 sogar um 90%. APV kann demnach die Widerstandsfähigkeit von landwirtschaftlichen Systemen gegen zukünftige Trockenperioden erhöhen. In einer kleinen APV-Anlage in Frankreich (0.17 ha) verringerte sich der Wasserverbrauch der darunter angebauten Salate um ca. 20 % bei einer Verzögerung von 3 - 7 Tagen in der Pflanzenreife (Elamri et al., 2018). Das Potenzial von APV scheint denn auch am

höchsten in ariden und semiariden Klimaregionen mit begrenzten Wasserressourcen und hoher Sonneneinstrahlung (Trommsdorff et al., 2021).

Auf einer niederländischen Himbeerrfarm wurden speziell angefertigte, semitransparente kristalline Module verwendet, die etwa 25 % des Sonnenlichts durchlassen. Zwar waren die Himbeer-Erträge unter den semitransparenten Modulen (Gesamtleistung 150 KW) um ca. 20 % geringer als unter den Folientunneln, jedoch konnten sie vor Sonnenbrand bewahrt werden. Die Erntearbeiten waren zudem berechenbarer und konnten kontinuierlicher durchgeführt werden, weil die Durchschnittstemperatur unter den Modulreihen rund 5 °C tiefer war. Mit diesem Verfahren könnten Erntespitzen mit schlechten Preisen vermieden werden, und den Pflückerinnen und Pflückern bieten die tieferen Temperaturen angenehmere Arbeitsbedingungen, so dass auch über die heissen Mittagsstunden gearbeitet werden kann. Ein weiterer Vorteil bestehe darin, dass die Modulaufständigung 30 Jahre lang halte, Folientunnel jedoch alle sechs Jahre ausgetauscht werden müssten (<https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/solar/himbeeren-unter-solarmodulen-statt-unter-folientunneln>).

In einer aktuellen ZHAW-Bachelorarbeit ging Horica (2021) der Frage nach, wie APV im Rebbau eingesetzt werden könnte. Seine Messungen in einer kleinen Versuchsanlage in Walenstadt (50 Panels auf 64 m²) ergaben tiefere Durchschnittstemperaturen und eine höhere mittlere relative Luftfeuchtigkeit unter den PV-Modulen. Die Temperaturschwankungen in der freistehenden Kontrollfläche waren höher, hingegen zeigten sich keine signifikanten Unterschiede in einer Frostnacht. Es ergaben sich keine relevanten negativen Auswirkungen auf den Ernteertrag oder auf die Weinqualität, der Zuckergehalt auf der Kontrollfläche war jedoch um 11 % höher als jener der APV-Versuchsfläche. Der Verlust des Zuckergehaltes und die dadurch resultierende Entwicklungsverzögerung kann jedoch gemäss Horica (2021) durch eine spätere Ernte kompensiert werden. Aufgrund der kleinflächigen singulären Versuchsanlage sind die Resultate aber mit Vorsicht zu interpretieren.

Im Weinbau bietet APV den Vorteil, dass der Alkoholgehalt gesteuert und Sonnenbrand bei den Trauben vermieden werden kann. Winzer in Deutschland sind zunehmend mit dem Problem konfrontiert, dass sich die Weinernte aufgrund des Klimawandels um drei bis vier Wochen verfrüht und die Weine einen zu hohen Zucker- und Alkoholgehalt haben, ihnen jedoch die Säure und innere Reife fehlt (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020). Im Obstbau und bei Beerenkulturen kann APV vor Hagelschäden schützen, was bei Kosten von rund 22'000 Euro pro ha für Hagelschutznetze wirtschaftlich bedeutend ist (<https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/solar/himbeeren-unter-solarmodulen-statt-unter-folientunneln>).

Auswirkungen auf die Nutztierhaltung

Dank der Beschattung können APV-Anlagen, die in Milchvieh-Weidesysteme integriert werden, den Hitzestress bei Kühen lindern und die Effizienz der Landnutzung verbessern (Sharpe, Heins, Buchanan, & Reese, 2021).

Solar grazing (APV mit Beweidung) gewinnt in Teilen der USA zunehmend an Popularität. Es führt zu einem Zusatzeinkommen für Landwirte und mindert den Verbrauch fossiler Brennstoffe durch Mähmaschinen. *Solar grazing* wird zudem als probate Nutzungsform für die Insektenförderung erachtet, besonders wenn auf den Grünflächen Blumenwiesen-Saatgut ausgebracht wird (<https://www.pressherald.com/2021/07/04/at-solar-farms-sheep-come-back-for-mower>).

Beobachtungen aus den USA zeigen, dass Kühe und Kälber die schattigen Bereiche unter den APV-Panels regelmässig nutzen (<https://www.dairybusiness.com/solar-panels-double-as-summer-cow-shades>).

Die geringe Wärmestrahlung unter PV-Panels, ca. minus 40 W pro m² im Vergleich zu Textiltüchern, führte in Brasilien dazu, dass Schafe und Lämmer weniger als 1 % ihrer Zeit unter dem Schatten von Textiltüchern verbrachten, verglichen mit 38 % unter dem Schatten von PV-Panels (Maia et al., 2020). Die Beweidung mit Schafen ist viel effizienter als die zeitaufwändige Mahd, da viel Handarbeit zum Ausmähen rund um die Stützen entfällt (<https://amp.abc.net.au/article/100254256>).

Falls die Grünflächen unter den APV-Panels beweidet werden, wird eine Umtriebsweide im Wechsel mit Mahd als bestmöglicher Kompromiss hinsichtlich naturschutzfachlicher Belange betrachtet (Schalow, 2013).

4.5.2 Gesellschaftliche Akzeptanz

In der weltweit ersten Studie zur Akzeptanz von APV in der breiten Bevölkerung wurden in Deutschland mehr als 2'000 Personen zwischen 18 und 80 Jahren befragt (Ketzler, Weinberger, Rösch, & Seitz, 2020). Insgesamt zeigte sich eine positive Grundhaltung gegenüber der APV, die Akzeptanz sank jedoch, wenn ausserhalb des Kulturlands noch freie Flächen vorhanden waren, z.B. Dächer und Industrieareale. Die Befragten zeigten eine gewisse Skepsis, dass Landwirte die Nahrungsmittelproduktion vernachlässigen könnten, sobald eine APV-Anlage installiert sei, weshalb verbindliche Regelungen notwendig seien. Es sollten landschaftlich weniger attraktive Gebiete für die APV genutzt werden, um nicht das Landschaftsbild und den Tourismus zu schädigen. Weiter gelte es, stets die lokalen Besonderheiten zu berücksichtigen, weshalb Entscheidungen über APV-Standorte auf kommunaler Ebene gefällt werden müssten. Ein frühzeitiger Einbezug der Interessensgruppen und der lokalen Bevölkerung wird auch durch das Fraunhofer-Institut als wichtig erachtet (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020). Rösch (2016) betont, dass APV-Anlagen naturverträglich in das Landschaftsbild integriert werden sollten, um eine grössere Akzeptanz zu erreichen, etwa mit kaschierenden Hecken und Bäumen.

Die Gewinnung von Solarenergie geniesst eine höhere Akzeptanz in der Bevölkerung als der Bau von Windkraftanlagen (Bosch & Peyke, 2011).

Solkraftwerke erwiesen sich in strukturierten Befragungen besonders dann als umstrittene Blickfänge in der Landschaft, wenn die Befragten die Landschaft als idyllische, ländliche Szene wahrnahmen. Umgekehrt akzeptierten diejenigen, welche die Landschaft unter utilitaristischen Gesichtspunkten sahen, gut in die Landschaft integrierte Anlagen (Bevk & Golobič, 2020).

APV könnte zu einer höheren Akzeptanz für die Energiewende in der Gesellschaft sorgen, da durch APV keine landwirtschaftliche Nutzfläche verloren geht und der Importdruck nicht steigt. Zudem bietet sich APV

als Alternative zum umstrittenen Anbau von Energiepflanzen für die Biogasproduktion an. APV hat zwar eine geringere Leistung als konventionelle PV, da nur ein Teil der Fläche mit Modulen bestückt ist, trotzdem ist sie deutlich höher als der Flächenstromertrag von Biogasanlagen (Rösch, 2016).

4.5.3 Ökosystemleistungen und Biodiversität

Es fanden sich im Rahmen dieser Literaturrecherche keine quantitativen wissenschaftlichen Untersuchungen zu den direkten Auswirkungen der APV auf Ökosystemleistungen und Biodiversität. Dank der Reduktion von Düngung und Pflanzenschutzmitteln sei aber generell mit einer positiven Wirkung auf die Insektenvielfalt und die lokale Biodiversität zu rechnen (Photovoltaic Austria, 2020). Besonders wenn die Fläche direkt unter bzw. um die APV-Anlage herum naturnah bewirtschaftet würden, erhielten sie einen zusätzlichen Mehrwert für die Nützlingsförderung. Allgemeine Effekte von Freiflächen-PVA auf Ökosystemleistungen und Biodiversität wurden bereits in den Kapiteln 4.1 bis 4.4 thematisiert.

4.6 Floating Photovoltaik (FPV)

FPV hat sich in den letzten fünf Jahren stark verbreitet und kommt inzwischen in 35 Ländern zum Einsatz (Exley, 2021). Die meisten Anlagen wurden bisher in Asien erstellt, in den letzten Jahren ist aber auch in Europa ein zunehmendes Interesse feststellbar (Lammerant et al., 2020). Die zehn grössten schwimmenden Solarkraftwerke stehen alle in Asien. Das weltweit grösste befindet sich in China und weist eine Leistung von 2.1 GW auf (<https://www.power-technology.com/features/worlds-biggest-floating-solar-farms/>).

Zu den Auswirkungen von schwimmenden Solaranlagen auf Natur und Umwelt gibt es nur spärliche Literatur. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass die Umweltauswirkungen gering sind und die Sauberkeit des Wassers nicht beeinträchtigt wird. Studien hierzu sind im Gange, Aussagen sind jedoch gemäss Lammerant et al. (2020) bisher noch eher spekulativ.

FPV-induzierte Änderungen der Windgeschwindigkeit auf dem Wasser und der Einfluss der Sonneneinstrahlung auf die thermische Struktur eines Sees erwiesen sich in Computersimulationen als stark abhängig vom Systemdesign. Je nach Gewässertyp und Anwendungsbereich habe FPV das Potenzial, die Auswirkungen des Klimawandels auf Gewässer abzumildern oder aber auch schädlich auf das Gewässerökosystem einzuwirken (Exley, Armstrong, Page, & Jones, 2021). In einem konkreten Anwendungsbeispiel wurde für eine englischen See errechnet, dass sich durch FPV eine Reduktion der Windgeschwindigkeit und der Sonneneinstrahlung auf dem gesamten See um je 10 % ergeben (Exley, 2021). Damit könnte gemäss Autor eine Dekade der Erwärmung durch den Klimawandel ausgeglichen werden, und das kühlere Wasser würde gleichzeitig toxische Algenblüten verringern. Auch Rosa-Clot (2020) erwähnt in diesem Zusammenhang die bei höheren Wassertemperaturen (Erderwärmung) stärker auftretenden Algenblüten. Diese könnten zwar durch FPV nicht vollständig beseitigt, aber einfach und effizient (kein Landverbrauch) reduziert werden. Solche Algenblüten treten vermehrt auch an Schweizer Seen auf und haben im Sommer 2021 zu mehreren tödlichen Vergiftungen bei Hunden am Zürcher Obersee geführt (Tages-Anzeiger vom 4.8.2021). Auf dem Hüttnersee im Kanton Zürich hat eine starke Algenblüte die Behörden dazu veranlasst, den See für Badende vorübergehend zu sperren (NZZ vom 24.8.2021).

Dank des Kühleffekts des Wassers ist der Wirkungsgrad von FPV-Systemen um bis zu 12.5 % höher als bei landbasierten PVA. Damit verbunden ist ein geringerer Flächenbedarf für dieselbe Stromerzeugung (Exley, 2021). Sahu et al. (2016) beziffern die Vorteile wie folgt: Der Wirkungsgrad von FPV-Anlagen sei 11 % höher und die Wasserverdunstung 70 % kleiner als bei vergleichbaren Solarkraftwerken an Land. Dafür sei mit rund 20 % höheren Investitionskosten zu rechnen.

Bei der Bestückung von sieben Trinkwasser-Reservoirs mit Flächen von 3 bis 272 ha in den Niederlanden ergab sich ein maximales FPV-Potenzial von rund einem Fünftel bis zu einem Drittel der Wasserfläche (Mathijssen et al., 2020). Die Autoren stellten nur eine geringe Freisetzung von Schwermetallen und keinen Eintrag von organischen Mikroverunreinigungen ins Wasser fest und argumentieren, dass durch die Trinkwasseraufbereitung die freigesetzten Schwermetalle (teilweise) wieder entfernt werden könnten.

Vögel scheinen durch FPV-Anlagen nicht gestört zu werden, was wiederum zu einem Problem durch Kotverschmutzung auf den Solarpanels führen kann. Fische halten sich gerne unter und zwischen FPV-Anlagen auf (Beschattung, spezielle Algenfauna) und entziehen sich so zum Teil den Fischern (Rosa-Clot, 2020). Schon bestehende Flosse für Fischzuchten könnten dabei ohne grossen Aufwand mit Solarpanels bestückt werden.

Die britische Firma *Aquatera* (zitiert in Lammerant et al., 2020) vergleicht die potenziellen Auswirkungen von FPV-Anlagen auf Binnenland-Seen mit solchen im Meer. Im Binnenland wird eine leichte Störung des Benthos erwartet, entweder durch den direkten Verlust von benthischem Lebensraum oder durch Sedimentfahnen, die die Atmungssysteme oder Nahrungsanhänge von benthischen Organismen blockieren könnten. Ein positiver Effekt wird hingegen für Fische erwartet, da Unterwasserstrukturen (z. B. Geräte und Verankerungen) einen «Riffeffekt» erzeugen können. Es ist denkbar, dass die Anlagen Hindernisse für die Schleppnetzfischerei schaffen, was zum Schutz der lokalen Fischbestände beitragen könnte.

Chang et al. (2014) erforschten in Taiwan die Auswirkungen von kleinflächigen FPV-Systemen auf Algen und aquatische Insekten in Süssgewässern. Sie errichteten dazu kleine, je 60 x 60 cm messende *Green Energy Artificial Floating Islands* (GAFI) und bestückten diese mit PV-Panels. GAFI können die Wasserschichtung aufbrechen, das Wasser homogenisieren und das Wachstum von Algen hemmen. Die Autoren sind der Ansicht, dass die Wasserqualität schnell verbessert und die Artenvielfalt bzw. Häufigkeit der aquatischen Wirbellosen-Fauna erhöht werden könnte.

5. Synthese

5.1 Auswirkungen von Freiflächen-PVA auf Umwelt und Biodiversität

5.1.1 Allgemeines

Bei einer gesamtheitlichen Betrachtung der in Kapitel 4 aufgeführten positiven und negativen Auswirkungen von Freiflächen-PVA auf Umwelt und Biodiversität **überwiegen die Vorteile**, vorausgesetzt, dass die Solaranlage **weder direkt noch indirekt ökologisch sensible Lebensräume beeinträchtigt** und bei deren Erstellung in erster Linie **bereits versiegelte oder intensiv genutzte Flächen** berücksichtigt werden (Demuth et al., 2019). Dank der teilweisen Beschattung durch die Solarpanels entsteht ein **kleinräumiges Nebeneinander von verschiedensten Lebensräumen**, das dank unterschiedlichen Mikroklimata mehr Arten Platz bietet als uniforme Lebensräume (Herden et al., 2009).

Falls in unmittelbarer Umgebung hochwertige Ausweichhabitate in genügender Ausdehnung und Dichte vorkommen (**intakter Lebensraumverbund**), ist die Erstellung eines Solarparks weniger kritisch, als wenn das zu überbauende Gelände seltene und einzigartige Lebensräume enthält (Wilson & van Zyl, 2012). Mit zunehmender Fragmentierung gewinnt der Lebensraumverbund an Bedeutung (Fartmann, Stuhldreher, Streitberger, & Helbing, 2021). Zentral für die Zuwanderung und somit für die Biodiversität einer Anlage ist die **Distanz zu Lieferbiotopen**, die möglichst unter 500 m betragen sollte (Fechner, 2020). Diese Distanz kann stark variieren und ist abhängig von der zu betrachtenden Art sowie von den vorhandenen Habitattypen.

Da jede Tierart oder Artengruppe spezifische Ansprüche an ihren Lebensraum stellt, muss bei der Beurteilung der faunistischen Umweltverträglichkeit eines Solarparks immer **situativ** entschieden werden, welche Ziel- und Indikatorgruppen (Moore-O'Leary et al., 2017) und welche Beurteilungsverfahren (Herden et al., 2009) im Vordergrund stehen. Zur **Förderung der Projektakzeptanz** einer Freiflächen-PVA in der Öffentlichkeit, für die Geldbeschaffung und für die Medienarbeit empfiehlt sich der Einbezug von Flaggschiff-Arten (*flagship species*) als **Sympathieträger**, z.B. Schmetterlinge, attraktive Vogel-Arten oder Säugetiere wie etwa Iltis und Feldhase (Schlegel & Rupf, 2010).

In der Projektierungsphase und während der Errichtung einer Freiflächen-PVA hat eine **kompetente Umweltbaubegleitung** zu gewährleisten, dass **negative Auswirkungen auf Fauna und Flora möglichst frühzeitig erkannt** und in der Folge **vermieden bzw. minimiert** werden können (Demuth et al., 2019). Dies kann beispielsweise durch Baustellenerschliessung mittels bodenschonender Schotterrassen, durch fachgerechte Bepflanzungen und Ansaaten oder durch Rücksichtnahme auf die Fortpflanzungszeiten von Vögeln und anderen Tiergruppen erfolgen.

5.1.2 Vorteile

Zusammenfassend ergeben sich die folgenden hauptsächlichen positiven Effekte von Freiflächen-PVA auf Umwelt und Biodiversität im Allgemeinen und auf die spezifische Förderung ausgewählter Zielarten im Speziellen:

Förderung des ökologischen Ausgleichs in der Agrarlandschaft

In Solarparks gibt es im Durchschnitt 70-95 % verfügbaren Boden, auf dem die Biodiversität gefördert werden kann, falls naturfördernde Managementpraktiken umgesetzt werden (Esteves, 2016, zitiert in Taylor et al., 2019). **Ein solch hoher Anteil an potenziellen Biodiversitätsförderflächen findet sich in der konventionell genutzten Kulturlandschaft praktisch nie.** In der Schweiz beträgt der durchschnittliche Anteil an Biodiversitätsförderflächen 18.8 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche, in der Talzone 14.5 % (BLW, 2020).

Refugien für störungsempfindliche Wildtiere

Eine naturnahe Vegetationsentwicklung und das Fehlen einer mechanischen Bodenbearbeitung in Solarparks kann gemäss Herden et al. (2009) zu einer **Aufwertung der Lebensraumfunktionen für störungsempfindliche Wildtiere** führen, auch wenn baubedingte Störungen eine zeitweise Meidung wahrscheinlich machen.

Mehrere Berichte weisen anekdotisch darauf hin, dass die Umzäunung grossflächiger Solarparks dem **Schutz von Kleinsäugetern vor externen Prädatoren und Störungen** aus der Umgebung dienen (z.B. Moore-O'Leary et al., 2017), ohne sich jedoch dabei auf aussagekräftige quantitative Daten abstützen zu können.

Bodenbrütende und störungsempfindliche Vögel finden dank Sicherheitszäunen geschützte Brutareale innerhalb von Freiflächen-PVA vor (Taylor et al., 2019). Insbesondere in intensiv genutzten Agrarlandschaften haben extensiv genutzte Solarparks das Potenzial, sich zu wertvollen avifaunistischen Lebensräumen zu entwickeln (Demuth et al., 2019), vor allem für verhaltensflexible Kulturlandvögel (Moore-O'Leary et al. 2017). Brutnachweise von 16 gefährdeten Vogel-Arten des Offenlands in niedersächsischen Freiflächen-PVA, darunter Wachtel, Rebhuhn, Neuntöter, Braunkehlchen und Grauammer (Badelt et al., 2020) bestätigen die Aussage von Günnewig et al. (2007), wonach auch **Wiesenbrüter und andere anspruchsvollere Lebensraumspezialisten von störungsarmen Solarparks profitieren** können. Gestützt wird diese Aussage durch eine Untersuchung aus Thüringen mit Vorkommen von Feldlerche und Baumpieper während der Brutzeit (Lieder & Lumpe, 2011) und eine solche aus Bayern mit Nachweisen von Rebhuhn, Feldlerche und Baumpieper (Raab, 2015).

Genügend grosse Abstände zwischen den Modulreihen dürften einen erheblichen Einfluss auf die Individuenzahl und die erreichten Populationsdichten von gefährdeten, thermophilen Vögeln des Grünlands haben. Besonnte Streifen von 3 m und mehr sind besonders förderungswürdig (Peschel et al., 2019).

Es wird davon ausgegangen, dass **Reptilien** innerhalb von umzäunten Solarparks vor menschlichen Störungen und Fressfeinden besser geschützt sind (Moore-O'Leary et al., 2017). **Genügend grosse Abstände zwischen den Modulreihen** dürften dank höherer Sonneneinstrahlung auch im Falle von Reptilien einen positiven Einfluss auf die Populationsdichten haben (Peschel et al., 2019).

Auch wenn das Vorkommen von Gewässern in Solarparks die Ausnahme ist, können sich die Grünflächen bei entsprechender Ausgestaltung und Nutzung sehr wohl als **Landlebensraum oder auch als Wander-**

route für Amphibien eignen. **Geringe Abstände zwischen den Modulreihen** dürften in diesem Fall vorteilhaft sein, da Amphibien insbesondere in der warmen Jahreszeit Schatten bevorzugen (Peschel et al., 2019).

Verbesserte Nahrungsgrundlage für Herbivoren und räuberische Wirbeltiere

Die **extensive Bewirtschaftung** von Grünlandflächen, gegebenenfalls ergänzt mit **Wildblumen-Ansaaten**, fördert die pflanzliche Artenvielfalt und, damit direkt verbunden, auch die **Insektenvielfalt** (Fartmann, Jedicke, et al., 2021). Mittels **naturnaher Begrenzungselemente** wie Hecken, Gräben und Steinmauern ergeben sich weitere Fördermöglichkeiten für Wirbellose, ebenso durch die Installation von **künstlichen Strukturen** wie Nistkästen, Überwinterungsplätzen und Holzstapeln (Taylor et al., 2019).

Ein reicheres Insektenangebot verbessert wiederum die Nahrungsgrundlage für viele Sekundärkonsumenten unter den Säugetieren, Vögeln, Reptilien, Amphibien und räuberischen Wirbellosen. So können Freiflächen-PVA dank des zu erwartenden grösseren Insektenreichtums etwa die Funktion als Nahrungshabitate für Fledermäuse übernehmen (Peschel et al., 2019). Für Graureiher, Rohrweihe, Rotmilan, Baumfalke, Turmfalke, Rauchschnalbe und Star wurde die Nutzung deutscher Freiflächen-PVA als Nahrungshabitat nachgewiesen. Für Weissstorch, Wiesenweihe und Steinkauz wird deren Nutzung zumindest in den Randbereichen als möglich oder wahrscheinlich erachtet (Badelt et al., 2020).

Förderung der Vegetationsvielfalt und der Bestäuber-Fauna

Diverse Untersuchungen zeigen die enorme Bedeutung von Wildbienen und Schwebfliegen bei der Bestäubung von Kulturpflanzen. Wegen den in den letzten Jahren zunehmenden, krankheitsbedingten Ausfällen von Honigbienen können diese funktionellen Leistungen nicht genügend hoch eingeschätzt werden (Albrecht, Schmid, Hautier, & Müller, 2012). Solarparks, die reich an Pollen und Nektar produzierenden Pflanzen sind, können die Funktion als **Lebensraum und Ausbreitungszentrum für solche Bestäuber-Insekten (inkl. Honigbiene)** erfüllen, insbesondere dann, wenn über einen längeren Zeitraum blühende Pflanzen mit einem entsprechenden Nektar- und Pollenangebot vorhanden sind. Wo **gemischte Bestände von schattentoleranten und heliophilen Pflanzen** vorkommen, wird eine maximale Nischen- diversifizierung erzielt (Graham et al., 2021). Die Häufigkeit und Vielfalt an Bestäubern auf Plots mit voller Sonneneinstrahlung und Plots im Halbschatten waren in einer Untersuchung in den USA ähnlich, bei beiden jedoch grösser als auf Plots im Vollschatten (Graham et al., 2021). Auch falls kein signifikanter Unterschied zwischen der Anzahl Pflanzen-Arten unter und zwischen den PV-Panels festgestellt wird, darf davon ausgegangen werden, dass die **Artenzusammensetzung verschieden und das Spektrum an Bestäuber-Pflanzen erhöht** ist (Montag et al., 2016).

Voraussetzung für den Blütenreichtum einer Freiflächen-PVA ist ein **sachgerechter, extensiver Unterhalt der Grünflächen**. So korrelierte zum Beispiel die Häufigkeit von Hummeln mit dem botanischen Reichtum eines Solarparks (Montag et al., 2016). Beweidete Flächen in britischen Solarparks erwiesen sich gegenüber gemähten Wildblumenwiesen als weniger attraktiv für Hummeln (Parker & McQueen, 2013). Die Beweidungsintensität entscheidet über die floristische Vielfalt und den Blütenreichtum einer

Weide und beeinflusst auf diese Weise direkt die Zusammensetzung der Bestäuber-Fauna (Sjödín, Bengtsson, & Ekblom, 2008).

Ökosystemleistungen zugunsten der umliegenden Landwirtschaftsflächen

Wie im vorhergehenden Abschnitt und verschiedentlich im Text erwähnt, können extensiv genutzte Grünflächen in Solarparks blütenreiche Habitate für eine vielfältige Insekten-Fauna liefern. Unter der Annahme einer Bestäuber-Suchdistanz von 1.5 km (Walston et al., 2018) ergeben sich deshalb grosse **Synergien mit der umliegenden produzierenden Landwirtschaft**. Rund 14 % der heimischen Acker- und Dauerkulturfleichen auf ca. 43'000 ha sind von Bestäubungsleistungen abhängig (BFS, 2021).

Blütenreiche Lebensräume zeigen eine hohe Wirksamkeit bei der **natürlichen Schädlingsregulation**. So konnten in der Schweiz beispielsweise Schäden durch Getreideplattkäfer in umliegenden Winterweizen-Beständen dank blütenreichen Randstreifen um 61 % reduziert werden (Tschumi, Albrecht, Entling, & Jacot, 2015). Blütenreiche Lebensräume stellen somit eine **praktikable Alternative zu Pflanzenschutzmitteln** dar.

Mittels **naturnaher Begrenzungselemente** wie Hecken, Gräben und Steinmauern ergeben sich weitere Lebensräume für räuberische Arten, welche Schädlinge auf den angrenzenden Landwirtschaftsflächen dezimieren können.

Bestäubungsleistungen und natürliche Schädlingsbekämpfung sind beides wichtige Argumente für die **Projektpromotion und Akzeptanz** von Solarparks. Da gerade die Inanspruchnahme von landwirtschaftlichen Nutzflächen für Freiflächen-PVA bei einem Teil der Bevölkerung auf Skepsis stösst (Ketzer et al., 2020), können solche Argumente «machtentscheidend» sein.

Beitrag zum faunistischen Artenschutz am Beispiel der Tagfalter

Freiflächen-PVA können eine **ähnliche Tagfalter-Fauna wie extensives Grünland** aufweisen (Badelt et al., 2020), wobei letztere zu den artenreichsten Tagfalter-Lebensräumen zählen (Monnerat, Thorens, Walter, & Gonseth, 2007). Bestandserhebungen im deutschen Bundesland Brandenburg ergaben in Solarparks Nachweise von 44 Tagfalter-Arten, was rund 40 % aller Tagfalter-Arten dieses Bundeslands entspricht (Peschel et al., 2019). In bayrischen Solarparks resultierte eine deutliche Aufwertung im Vergleich zur vorherigen Intensivnutzung mit **Fortpflanzungsnachweisen einiger seltener und bedrohter Tagfalter-Arten**. Als besonders vorteilhaft erwiesen sich Hecken im Randbereich oder im näheren Umfeld mit Vorkommen von standorttypischen «Schmetterlingsgehölzen», z.B. Schwarzdorn, Rote Heckenkirsche, Kreuzdorn und Faulbaum (Raab, 2015). **Besonnte Streifen von mindestens 3 m Breite** sollen die Tagfalter-Diversität erheblich erhöhen, wobei hierzu noch Forschungsbedarf besteht (Peschel et al., 2019). Zudem eignen sich Schmetterlinge hervorragend als **Sympathieträger für die Projektpromotion** (vgl. Kap. 5.1.1).

Erosionsprävention, heterogenes Mikroklima und Klimaschutz

Nach einer allfälligen Entfernung der Vegetationsdecke während des Baus eines Solarparks können niedrig wachsende Gräser (mit oder ohne schattentolerante Arten) und Leguminosen innerhalb von drei Jahren eine umfangreiche neue Pflanzendecke bilden und so der **Bodenerosion vorbeugen** (Beatty et al., 2017; Uldrijan et al., 2021).

Der Schattenwurf durch die PV-Panels führt zu einem «Cooling-Effekt» und zu einer höheren Luftfeuchtigkeit unter den PV-Panels, was die **mikroklimatische Vielfalt eines Solarparks vergrössert** und, wie bereits oben erwähnt, die **Habitat-Heterogenität zugunsten von Fauna und Flora erweitert**. Die Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion und die Nutztierhaltung werden in Kapitel 5.2 näher ausgeführt.

Die Wiederherstellung einer naturnahen Grünlandvegetation innerhalb von USSE-Anlagen kann gemäss Modellberechnungen im Vergleich zur landwirtschaftlichen Nutzung vor dem Bau zu einer **Steigerung des Kohlenstoffspeicherpotenzials** um 65 % führen (Walston et al., 2021). Messungen in einer amerikanischen Solaranlage widersprechen hingegen dieser Aussage, da sieben Jahre nach der Begrünung die C- und N-Konzentrationen in den Böden noch immer tiefer waren als in den Referenzböden (Choi et al., 2020).

5.1.3 Nachteile

Nachfolgend werden die hauptsächlichen negativen Effekte von Freiflächen-PVA auf Umwelt und Biodiversität aufgeführt. Spezifische Lösungsansätze zeigen auf, wie mit diesen Problemen umgegangen werden könnte.

Barrierewirkung von Maschengitterzäunen für grössere Wildtiere

Die gängige Praxis, Solarparks als Schutz vor Diebstahl und Vandalismus mit Maschengitterzäunen zu umgrenzen, kann bei grossflächigen Solarparks eine **Barrierewirkung für grössere Wildtiere** zur Folge haben (Herden et al., 2009; Wagegg & Trumpp, 2015). Die **Fragmentierung von Lebensräumen** durch «gekappte» Migrationsrouten kann den Genfluss behindern und Populationen mittel- bis langfristig schädigen (Csencsics et al., 2014).

Problementschärfung:

- Vorgängige **Planung von Migrationskorridoren und «Ablenkstrukturen»** (z.B. Hecken und Krautsäume) für mobile Arten, welche durch die Zäune in ihrer Bewegungsfreiheit wesentlich eingeschränkt werden könnten (Demuth et al., 2019), v.a. in bedeutenden Wildwechseln. Als Grundlage dafür empfehlen sich Raumnutzungsanalysen (Thomas et al., 2018).
- Der **Bodenabstand des Zauns muss mindestens 15-20 cm** betragen und auf Stacheldraht in Bodennähe gilt es zu verzichten, um die Durchgängigkeit für Kleintiere zu gewährleisten (z.B. für mittelgrosse Säugetiere wie Feldhase oder Dachs, Kleinsäugetiere wie Hermelin oder Igel, aber auch für Reptilien und migrierende Amphibien) (Demuth et al., 2019; NABU & BSW Solar, 2021; Wilkening & Rautenstrauch, 2019).

Erhöhte Kollisionsgefahr für Vögel und Fledermäuse

Aus den verfügbaren Vogelmonitoring- und Mortalitätsdaten kamen Walston et al. (2016) zum Schluss, dass die geschätzte jährliche **Gesamt mortalität an USSE-Anlagen in Südkalifornien ähnlich hoch sei wie im Windenergiesektor**. Sie errechneten eine «capacity-weighted average mortality rate» von 2.7 bis 9.9 Vögeln pro MW und Jahr. Kosciuch et al. (2020) kamen mit ca. 2.5 auf einen ähnlichen Wert. Herden et al. (2009) schätzen das **Kollisionsrisiko für Vögel an PV-Panels als gering ein, v.a. im Vergleich zur begleitenden Infrastruktur** wie etwa Freileitungen. Bei einem nicht-tödlichen Aufprall könnten aber Vögel durch Sedierung anfälliger gegenüber Fressfeinden sein (Dwyer et al., 2018).

Medienberichte und Berichte aus der grauen Literatur weisen darauf hin, dass **Wasservögel grosse Solaranlagen mit Gewässern verwechseln** und durch polarisiertes Licht angezogen werden könnten (Taylor et al., 2019). Vögel, die im Flug trinken, z.B. Schwalben, könnten deshalb für Kollisionen mit PV-Panels besonders anfällig sein. Günnewig et al. (2007) weisen auf eine mögliche Stör- und Scheuchwirkung («Silhouetteneffekt») durch Solarpanels hin, was zu einer Entwertung avifaunistisch wertvoller Lebensräume führen könnte.

Fledermäuse können mit vertikal angeordneten, reflektierenden Platten kollidieren, wodurch auch **Solarpanels, die in einem steileren Winkel** angeordnet sind, zu Risikoobjekten werden. Die bereits mehrfach erwähnte Fehlinterpretation von spiegelnden PV-Panels als Wasseroberfläche durch bestimmte Insektengruppen könnten eine Attraktionswirkung auf Fledermäuse ausüben, die sich von Grossinsekten ernähren. Dies erhöht die Kollisionsgefahr zusätzlich. Eine kleine Vorstudie in englischen Solarparks ergab im Vergleich zu benachbarten Kontrollflächen gleich viele Fledermaus-Arten, jedoch bedeutend tiefere Individuenzahlen (Montag et al., 2016).

Problementschärfung:

→ **Keine Erstellung von Solarparks an sensiblen Orten** wie Zugrouten, wichtigen Nahrungshabitaten oder Kolonien von Vögeln und Fledermäusen.

Veränderung der Lebensraumbedingungen für spezialisierte Arten am Beispiel der Avifauna

Obschon die Vorteile naturnah gestalteter und unterhaltener Grünflächen in Solarparks gegenüber konventionellen landwirtschaftlichen Nutzflächen überwiegen (vgl. Kap. 5.1.2), sind nachteilige Effekte auf Lebensraumspezialisten möglich, so auch bei Vögeln. Dies ist beispielsweise dann zu erwarten, wenn eine Freiflächen-PVA auf einer **ökologisch sensiblen Fläche mit Vorkommen von Lebensraumspezialisten** errichtet wird, **ohne dass für diese Arten genügend Ausweichhabitate in der Umgebung** vorkommen. In Deutschland zeigte sich ein differenziertes Bild: Während in einigen Solarparks nebst Generalisten auch spezialisierte stenotope Vogel-Arten brüteten (Badelt et al., 2020; Lieder & Lumpe, 2011), fanden sich in anderen fast nur anspruchslose Lebensraumgeneralisten (Tröltzsch & Neuling, 2013). Eine konkrete Untersuchung hierzu betrifft die stenotope Grauammer, eine vielerorts seltene Vogelart, die nach Errichtung eines Solarparks in Deutschland über Jahre kontinuierlich abnahm (Heindl, 2016).

Problementschärfung:

- **Keine Erstellung von Freiflächen-PVA auf ökologisch sensiblen Flächen**, insbesondere wenn für lokal vorkommende Lebensraumspezialisten nicht genügend Ausweichhabitats der näheren Umgebung vorkommen.
- Den **Strukturreichtum innerhalb oder am Rand von Solaranlagen verbessern** (z.B. Steinhäufen, Beeren- und Dornensträucher, Nistgelegenheiten mit Bruthöhlen).
- **Blütenreiche und nährstoffarme Grünflächen** zwischen den Panels fördern und schonend mähen bzw. beweiden.

«Ökologische Fallen» für aquatische und phototrophe Insekten

PV-Panels können horizontal polarisiertes Licht so stark reflektieren, dass sie für bestimmte wassergebundene Gliederfüssler **wie Wasserflächen erscheinen und diese zur Eiablage auf den Panels verleiten** («ökologische Fallen») (Horváth et al., 2010). Beleuchtete Solaranlagen könnten nachts Insekten anlocken, die dann um die Lichtquellen schwirren und an diesen verenden (Owens et al., 2020).

Problementschärfung:

- **Keine PVA in Gewässernähe.**
- **Bioreplizierte PV-Beschichtungen** mit spezieller Mikrotexur und **hell umrandete Solarzellen (weisse Rückseitenfolie)** können bei einzelnen aquatischen Tiergruppen die Attraktionswirkung vermindern.
- **Verzicht auf eine Beleuchtung** der Anlage.

Freisetzung toxischer Substanzen

Durch **Freisetzung von Nickel** aus monokristallinen **PV-Panels "der ersten Generation"** ergaben sich höhere Mortalitätsraten bzw. Entwicklungsstörungen bei aquatischen Invertebraten (Motta et al., 2016). Freisetzbare Mengen einiger **gefährlicher Metalle** (Blei, Chrom, Cadmium, Nickel) zeigten z.T. eine Überschreitung der gesetzlichen Grenzwerte für Boden und Wasser (Tammara et al., 2016). Im Umfeld chinesischer Freiflächen-PVA ergaben sich erhöhte Belastungswerte durch Fluorid und Chlorid (Wu et al., 2016). Bei der ökologisch-energetischen Bilanzierung einer polnischen PVA werden Silber, Nickel, Kupfer, PA6, Blei und Cadmium als besonders problematisch für Gesundheit und Umwelt bezeichnet (Piasecka et al., 2020). Freigesetzte Schwermetalle aus Perowskit-Solarzellen führten beim Zebrafisch (*Danio rerio*) zu unerwarteten **Vergiftungen in Form von Versauerung** (Babayigit et al., 2016). In der Schweiz sind jedoch kaum Solarmodule mit Cadmium und Nickel auf dem Markt und Module auf Siliziumbasis enthalten kein Cadmium und Nickel. Perowskit-Module kommen bisher nicht serienmässig zum Einsatz (Auskunft David Stickerberger, *Swissolar*, vom 11.10.2021 und Jürg Rohrer, ZHAW, vom 21.10.2021).

Badelt et al. (2020) hingegen stufen die betriebsbedingten Auswirkungen von Freiflächen-PVA auf den Boden und den Wasserhaushalt **im Allgemeinen als unerheblich** ein, auch wenn eine Kontamination mit Schadstoffen aus den verzinkten Modulhalterungen und -tragekonstruktionen denkbar sei. Ebert & Müller

(2011) vertreten den Standpunkt, dass die Gefahr einer Bodenkontamination durch PVA mit Blei oder Cadmium bei intakten Solarmodulen sehr gering sei.

Problementschärfung:

→ Beurteilung der Umweltverträglichkeit durch **frühzeitige Abklärung der möglichen Gefahren** einer Auswaschung potenziell toxischer Substanzen in Boden, Oberflächengewässer und Grundwasser.

Beeinträchtigung der gewachsenen Vegetation und Aufkommen von Neophyten

Solarparks haben aufgrund anthropogener Veränderungen und Störungen ein höheres Risiko für das **Aufkommen unerwünschter Neophyten** (Dhar et al., 2020). Standortgebundene Arten «stabiler» Lebensräume, wie sie vor dem Bau einer Freiflächen-PVA vorhanden waren, drohen zu verschwinden, falls Umsiedlungsbemühungen fruchtlos bleiben oder Neuansaat nicht den gewünschten Erfolg zeigen (Moore-O'Leary et al., 2017).

Problementschärfung:

→ Falls durch den Bau einer Freiflächen-PVA ein Abtrag oder eine Verletzung der Grasnarbe erfolgt, ist eine **rasche Wiederbegrünung mit Verwendung von regionalem Wildblumen-Saatgut** (lokale Ökotypen) und anschliessender **schonender, extensiver Nutzung** vorzusehen.

→ Offene, vegetationsarme Böden als mögliche **Keimstellen für Neophyten sind regelmässig zu überwachen** (offene Bodenstellen und Kies-/Sandflächen sind für wärmeliebende Insekten und spezialisierte Ruderalpflanzen jedoch sehr wichtig, deshalb möglichst nicht ganz darauf verzichten, vgl. dazu z.B. Fartmann, Stuhldreher, et al. (2021)).

→ **Auf Pflanzenschutzmittel verzichten**, höchstens Einzelstockbehandlung von invasiven Neophyten.

Erhöhter Wasser-Spitzenabfluss bei verdichteten Böden und Erosionsgefährdung

Während Solarmodule gemäss Cook Lauren M. & McCuen Richard H. (2013) selbst keinen signifikanten Einfluss auf Wasser-Abflussmengen oder auf Spitzenwerte haben, kann sich der **Spitzenabfluss bei verdichteten Böden unter und zwischen den PV-Panels erhöhen**. Die Randbereiche der PV-Module unterliegen stärkeren Regeneinflüssen, was bei Starkniederschlägen zu **Bodenerosion** führen kann (Badelt et al., 2020). Bodenverdichtungen können durch Errichtung von Baupisten, Lager- und Abstellflächen, Bodenumlagerungen und -durchmischungen während des Baubetriebs entstehen (Badelt et al., 2020).

Problementschärfung:

→ **Grössere Modulabstände** wirken einer unregelmässigen Verteilung der Niederschläge entgegen.

→ Mit einer **bodenkundlichen Umweltbaubegleitung** während den Erstellungsarbeiten möglichen Schäden bestmöglich vorbeugen.

→ **Sachgemäss gepflegte Grünflächen** beugen der Erosion vor und verhindern längerfristig unerwünschte Bodenverdichtungen.

5.2 Agro-Photovoltaik (APV)

5.2.1 Vorteile

Wie in Kapitel 4.5 detailliert ausgeführt wurde, kann die kombinierte Nutzung der landwirtschaftlichen Nutzfläche für die Produktion und die Energiegewinnung mittels APV verschiedene Vorteile mit sich bringen. Die hauptsächlichlichen Vorteile lassen sich folgendermassen zusammenfassen:

- **Mehr als 95 % der Fläche** unter den Solarpanels bleiben, mit Ausnahme der Stützen, für die landwirtschaftliche Nutzung erhalten und sind mit Traktoren befahrbar (i.d.R. Montage der APV-Panels in 3-6 m Höhe). Durch diese **Doppelnutzung** kann ein Landwirtschaftsbetrieb ein **Zusatz Einkommen als «Energiewirt»** generieren (Photovoltaic Austria, 2020).
- Falls unter einer APV-Anlage **extensiv genutzte Grünflächen** vorkommen und im Randbereich der Anlage **naturnahe oder künstliche Strukturen** angelegt werden, kann sich eine artenreiche Fauna und Flora ausbilden (Demuth et al., 2019; Raab, 2015). Davon profitieren auch «Nützlinge», die dann auf den umliegenden Landwirtschaftsflächen zur **natürlichen Schädlingsregulation** beitragen können.
- Bei Verzicht auf Düngung und Pflanzenschutzmittel ist generell mit einer **positiven Wirkung auf die Insektenvielfalt und auf die lokale Biodiversität** zu rechnen (Photovoltaic Austria, 2020).
- Gemäss Modellberechnungen ergeben sich in APV-Anlagen **im Optimalfall Produktivitätssteigerungen in der Landwirtschaft von bis zu 60-70 %** (Dupraz et al., 2011; Weselek et al., 2019).
- Die Evapotranspiration von Kulturpflanzen kann um 10-30 % reduziert sein, wenn das verfügbare Licht nur noch 50-70 % der vollen Sonneneinstrahlung entspricht (Marrou et al., 2013). In einer deutschen APV-Anlage war die Flächenproduktivität 2017 unter APV-Panels um 56-70 % höher als auf der Referenzfläche, im trockenen Hitzesommer 2018 sogar um 90 % (Trommsdorff et al., 2021). Dies ist **im Kontext mit dem Klimawandel vor allem für trockenheitsgefährdete Regionen von zentraler Bedeutung**.
- Dupraz et al. (2011) erwähnen ebenfalls einen möglichen **Schutz vor den Auswirkungen des Klimawandels durch APV**, z.B. vor Hagel und Überhitzung. Auch Barron-Gafford et al. (2019) weisen auf additive und synergetische Vorteile der Beschattung durch APV-Panels hin, einschliesslich reduziertem Trocken- und Hitzestress für die Kulturpflanzen.
- Dank **verringertes Bodenverdunstung sind deshalb v.a. bei schnell bodendeckenden Kulturen und schattentoleranten Nutzpflanzen Ertragssteigerungen** möglich (Rösch, 2016). Schattenliebende Kulturen wie etwa Erdbeeren und Spinat (Touil et al., 2021), Kartoffeln und Bohnen (BenGhida & BenGhida, 2019) profitieren tendenziell von der Beschattung durch APV. Die Erträge beim Salat fielen bei geringerer Sonneneinstrahlung von 50 % zum Teil höher aus als erwartet (*Radiation Interception Efficiency*: Salat bildet im Schatten grössere Blätter) (Marrou et al., 2013).

- Dass unter Umständen **auch heliophile Nutzpflanzen durch die APV profitieren** können, zeigte sich exemplarisch im Hitzesommer 2018, wo die Erträge von Winterweizen und Kartoffeln in Süddeutschland dank APV um 2.7 % bzw. 11 % gesteigert werden konnten (Weselek et al., 2021).
- Traditionell als **schattenintolerant geltende Kulturpflanzen** können unter Umständen auch **in sonnigeren Zwischenräumen** von APV-Anlagen gut gedeihen, wie Messungen an Tomatenpflanzen in den USA ergaben. Die Produktivität zwischen den Panelreihen war bei Wasserdefizit höher als in den Kontrollflächen ohne PV-Panels (AL-agele et al., 2021).
- Winzer in Deutschland sind zunehmend mit dem Problem konfrontiert, dass sich die Weinernte aufgrund des Klimawandels um drei bis vier Wochen verfrüht und die Weine einen zu hohen Zucker- und Alkoholgehalt haben, ihnen jedoch die Säure und innere Reife fehlt. APV bietet die **Chance, den Alkoholgehalt durch unterschiedliche Beschattungsintensitäten zu steuern** (<https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/solar/himbeeren-unter-solarmodulen-statt-unter-folientunneln>).
- APV eröffnet neue Chancen bei der **Kultivierung von Beeren**. Ein Pilotprojekt aus den Niederlanden zeigt, dass zwar der Ertrag bei Himbeeren gegenüber konventionellen Folientunneln leicht rückläufig ist, **dank Beschattung und tieferen Temperaturen unter den APV-Modulen dafür die Qualität steigt** (weniger Sonnenbrand) und Erntespitzen mit tieferen Preisen umgangen werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass die Modulaufständerung 30 Jahre lang hält, die Folientunnel jedoch alle sechs Jahre ausgewechselt werden müssen (<https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/solar/himbeeren-unter-solarmodulen-statt-unter-folientunneln>).
- Die Beschattung durch APV-Module kann den **Hitzestress bei Nutztieren lindern**, z.B. bei Schafen (Maia et al., 2020) und in Milchkuh-Weidesystemen (Sharpe et al., 2021). *Solar grazing* führt zu einem **geringeren Verbrauch fossiler Brennstoffe durch Mähmaschinen** und trägt zur Insektenförderung bei (<https://www.pressherald.com/2021/07/04/at-solar-farms-sheep-come-back-for-mower>). Zudem entfällt die zeitaufwändige Handarbeit zum Ausmähen rund um die Stützen.
- APV kann zu einer allgemein höheren Akzeptanz für die Energiewende in der Gesellschaft führen, da durch APV **keine landwirtschaftliche Nutzfläche verloren geht** und eine Alternative zum umstrittenen Anbau von Energiepflanzen für die Biogasproduktion zur Verfügung steht (Rösch, 2016).

5.2.2 Nachteile

Mögliche Nachteile und Vorbehalte gegenüber der APV können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die photosynthetisch aktive Strahlung und die Bodentemperaturen während des Sommers sind unter APV-Modulen tiefer (Weselek et al., 2021), was vor allem den **Ertrag von lichtbedürftigen Kulturpflanzen wie etwa Weizen mindern** kann (Rösch, 2016). Ein eher negativer Effekt soll sich gemäss Photovoltaic Austria (2020) bei Weizen, Dinkel, Mais, Speisekürbis, Wein, Obstkulturen, Sonnenblumen, Erdbeeren, Kohl und Hirse ergeben, ohne jedoch weitere Angaben zur Beschattungsintensität zu liefern. Vergleichbare Erträge sollen bei Roggen, Gerste, Raps, Erbsen, Spargel, Karotte, Kohl, Rettich und Tabak resultieren.

- Umfragen in Deutschland ergaben eine gewisse Skepsis in der Bevölkerung, dass Landwirte die **Nahrungsmittelproduktion vernachlässigen** könnten, sofern sie künftig vermehrt auf APV setzen. Zudem scheint die Akzeptanz von APV zu sinken, wenn **ausserhalb des Kulturlands noch freie Flächen vorhanden** sind, z.B. auf Dächern und Industriearealen (Ketzer et al., 2020).
- Um mögliche negative Folgen auf das Landschaftsbild und den Tourismus zu vermeiden, sollten nur **landschaftlich weniger attraktive Gebiete** für die APV genutzt und **lokale Besonderheiten** berücksichtigt werden. Entscheidungen über APV-Standorte sind auf kommunaler Ebene zu fällen (Ketzer et al., 2020), mit verbindlichen Vorgaben für eine bestmögliche Integration in das Landschaftsbild, z.B. mit umgebenden Gehölzen (Rösch, 2016).

APV in der Schweiz: wie weiter?

Aufgrund der Weiterentwicklung technischer Lösungsansätze im Ausland und politischer Vorstösse, die APV in der Schweiz näher zu prüfen, hat das Bundesamt für Landwirtschaft Ende 2020 einem interdisziplinären Team der ZHAW den Auftrag für die Durchführung einer **Machbarkeitsstudie zum Thema Agro-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft** erteilt. Die Studie ist in Erarbeitung und soll Potenziale sowie Risiken für die Integration von Energieerzeugungssystemen in die landwirtschaftliche Produktion untersuchen (Jäger, 2021).

Die rechtlichen Hürden für Freiflächen-PVA «auf der grünen» Wiese sind in der Schweiz sehr hoch. 2012 verwies der Bundesrat in einer Antwort auf ein Postulat auf das noch **vorhandene grosse Potenzial für PV an Gebäudeflächen**. Das geltende **Raumplanungsrecht** schliesse freistehende Solaranlagen zwar nicht ausdrücklich aus. Die Standortgebundenheit solcher Anlagen ausserhalb der Bauzone sei aber mit Blick auf das grosse Potenzial auf bestehenden Gebäuden **«nur in den allerseltensten Fällen»** gegeben (<https://www.sses.ch/de/clevere-doppelnutzung-der-landflaeche/>).

Das Eidgenössische Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK) hat am 11. Oktober 2021 die **Vernehmlassung zur Änderung der Raumplanungsverordnung** eröffnet. Zum Revisionspaket gehören Klärungen in Bezug auf Solaranlagen ausserhalb der Bauzonen. Nach Art. 32c Abs 1 Bst c der revidierten RPV könnten Solaranlagen mit Anschluss ans Stromnetz ausserhalb der Bauzonen insbesondere dann standortgebunden (Art. 24 Bst. a RPG) sein, wenn sie in Gebieten erstellt werden, die "an Bauzonen angrenzen, in Strukturen integriert werden, die an Bauzonen angrenzen, in **Strukturen integriert werden, die Vorteile für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung bewirken oder die entsprechenden Versuchs- und Forschungszwecken dienen**" (https://fedlex.data.admin.ch/filestore/fedlex.data.admin.ch/eli/dl/proj/2021/102/cons_1/doc_2/de/pdf-a/fedlex-data-admin-ch-eli-dl-proj-2021-102-cons_1-doc_2-de-pdf-a.pdf).¹

¹ Jürg Rohrer vermerkt hierzu, dass nach Meinung von Fachleuten der Passus "...die Vorteile für die landwirtschaftliche Bewirtschaftung bewirken..." als Begründung für die APV viel zu kurz greife. Er weist dabei auf die bereits bestehende deutsche Norm **DIN SPEC 91434 "Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung"**. Diese könnte in angepasster Form evtl. auch in der Schweiz Verwendung finden (Auskunft Jürg Rohrer, ZHAW, vom 8.11.2021).

Der erläuternde Bericht präzisiert die Vorgaben zu Art. 32c Abs 1 Bst c folgendermassen: "Es reicht nicht, dass *trotz* der Solaranlagen noch Landwirtschaft betrieben werden kann. Es geht vielmehr darum, dass *dank* der Solaranlagen höhere Erträge erzielt werden sollen als ohne solche Anlagen. **Zulässig sind einerseits Forschungsanlagen, die aufgrund berechtigter Erwartungen in der Fachwelt entsprechende Erkenntnisse liefern sollen. Andererseits können Anlagen bewilligt werden, welche gesicherte Erkenntnisse aus den Forschungsanlagen nutzen.**" (https://fedlex.data.admin.ch/filestore/fedlex.data.admin.ch/eli/dl/proj/2021/102/cons_1/doc_8/de/pdf-a/fedlex-data-admin-ch-eli-dl-proj-2021-102-cons_1-doc_8-de-pdf-a.pdf). Das Inkrafttreten der Änderung ist für den 1. Juli 2022 geplant (<https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/news-und-medien/medienmitteilungen/mm-test.msg-id-85276.html>).

Es ist davon auszugehen, dass ein Ausbau der APV auch in Kreisen des Landschaftsschutzes auf Kritik stossen wird. Eine technische Innovation könnte dieser Kritik entgegenwirken: Die **organische Photovoltaik ermöglicht eine grössere farbliche Flexibilität** und dezentere Farbwahl der Panels und somit eine bessere Integration ins Landschaftsbild. Organische PV-Panels sind zudem deutlich lichtdurchlässiger als kristalline Module. Diesen Vorteilen stehen der derzeit geringe Wirkungsgrad und die bisher kurze Haltbarkeit gegenüber (<https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/solar/himbeeren-unter-solarmodulen-statt-unter-folientunneln>).

In der Schweiz gilt der limitierende Passus, wonach **Freiflächen-PVA, und somit auch APV, per Definition nicht zur landwirtschaftlichen Nutzfläche gehören** (*Landwirtschaftliche Begriffsverordnung LBV* Art. 16). Da Direktzahlungen via *Direktzahlungsverordnung DZV* nur für Flächen innerhalb der landwirtschaftlichen Nutzfläche entrichtet werden (DZV Art. 35 Abs. 1), gibt es für APV-Flächen demnach keinerlei DZV-Beiträge. Dies bedeutet, dass durch die Landwirtschaft weder Basis- noch Biodiversitätsbeiträge beansprucht werden können, selbst wenn die Flächen unter den Panels extensiv bewirtschaftet werden und dadurch einen Beitrag an die lokale Biodiversität leisten. Eine erfolgreiche Promotion der APV in der Schweizer Landwirtschaft setzt aber voraus, dass die finanziellen Rahmenbedingungen für die Bauernbetriebe stimmen. **Ein Lösungsansatz könnte darin liegen, dass Grünflächen unter APV zwingend als Biodiversitätsförderflächen (BFF) bewirtschaftet werden müssen, dafür im Gegenzug der landwirtschaftlichen Nutzfläche angerechnet werden dürfen und entsprechend beitragsberechtigt sind.** Infrage kämen dafür primär die BFF-Typen *Extensiv genutzte Wiese* und *Extensiv genutzte Weide*. In Anhang 4 der DZV sind die jeweiligen Bewirtschaftungsvorgaben für alle BFF-Typen definiert, in Anhang 7 die Beitragsansätze aufgelistet. Ein direktzahlungsberechtigter Betrieb in der Talzone erhält beispielsweise für eine *Extensiv genutzte Wiese* je nach Qualitätsstufe derzeit einen Betrag von 1'080 bzw. 1'920 Fr. pro ha und Jahr. Dazu kommen dann je nach Ausgangslage noch weitere Direktzahlungen wie etwa der Basisbeitrag (für BFF 450 Fr. pro ha und Jahr), allfällige Vernetzungsbeiträge (1'000 Fr. für *Extensiv genutzte Wiesen* bzw. 500 Fr. für *Extensiv genutzte Weiden* pro ha und Jahr) sowie Landschaftsqualitätsbeiträge (max. 120 Fr. pro ha und Jahr). Eine **Erstellung von APV-Anlagen auf bereits bestehenden BFF oder auf anderen ökologisch sensiblen Flächen sollte von vornherein ausgeschlossen werden.**

Da sich **Biodiversitätsförderflächen auf Ackerland** (Buntbrachen, Rotationsbrachen, Ackerschonstreifen, Blühstreifen, Saum auf Ackerfläche) **unter APV-Anlagen** weniger gut mit der produzierenden Landwirtschaft vereinbaren lassen als die oben genannten Grünflächen, erscheint eine **vergleichbare BFF-Verpflichtung wenig zielführend**. Für die landwirtschaftliche Produktion genutzte Ackerflächen unter APV könnten unter Umständen deshalb weiterhin von der landwirtschaftlichen Nutzfläche und damit von den Direktzahlungen ausgenommen bleiben. Die Landwirte sollten jedoch generell dazu ermuntert werden, den ökologischen Ausgleich auf ihrem Betrieb nicht nur auf Grünflächen zu konzentrieren, sondern auch BFF auf Ackerland miteinzubeziehen.

Ein Blick ins **Ausland** beweist, dass sich die APV-Technologie in den letzten Jahren vielerorts sehr **dynamisch entwickelt** hat. Die installierte APV-Leistung stieg exponentiell von ca. 5 MW im Jahr 2012 auf ca. 2.9 GW im Jahr 2018, mit staatlichen Förderprogrammen in Japan (seit 2013), China (ca. 2014), Frankreich (seit 2017), den USA (seit 2018) und zuletzt Korea (<https://www.axpo.com/ch/de/ueber-uns/magazin.detail.html/magazin/erneuerbare-energien/Oben-Solarstrom-unten-Haerdoepfu.html>).

Seit 2017 werden in **Deutschland** dank einer erweiterten Flächentyp-Definition in definierten Gebieten sowohl Ackerland als auch Grünland als Standorte für Freiflächen-PVA akzeptiert (Riedl et al., 2020). Solarstrom ist z.B. auf Ackerflächen förderfähig, wenn diese in einem Abstand von mindestens 110 m zu Autobahnen oder Schienenwegen liegen (<https://www.clearingstelle-eeg-kwkg.de/haeufige-rechtsfrage/45>).

Die Hürden für die Umsetzung von APV-Projekten in Kombination mit ökologischer Aufwertung sind jedoch auch in Deutschland noch hoch (Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme, 2020). Bislang gilt die stark einschränkende Vorgabe, dass Projektierende von Solarparks ökologische Ausgleichsmassnahmen ausserhalb der APV-Anlagen ergreifen müssen. Zumindest im Bundesland Bayern soll sich dies künftig ändern, dann sollen auch ökologische Ausgleichsmassnahmen innerhalb von Freiflächen-PVA erlaubt sein (<https://www.pv-magazine.de/2020/11/13/bayern-wird-demnaechst-oekologische-ausgleichsmassnahmen-innerhalb-von-photovoltaik-freiflaechen-erlauben>).

5.3 Floating Photovoltaik (FPV)

FPV befindet sich global im Aufwind, zu den unmittelbaren Auswirkungen auf Natur und Umwelt gibt es jedoch bisher nur wenig Literatur (Lammerant et al., 2020). Je nach Gewässertyp und Anwendungsbereich hat FPV das Potenzial, **Auswirkungen des Klimawandels auf Gewässer abzumildern oder aber auch schädlich auf das Gewässerökosystem einzuwirken** (Exley et al., 2021).

Ein Fallbeispiel für eine alpine FPV-Anlage auf dem Lac des Toules im Kanton Wallis wird in Kapitel 5.4 präsentiert.

5.3.1 Vorteile

→ Höhere Wassertemperaturen durch die Erderwärmung können zwar durch FPV nicht vollständig beseitigt, aber einfach und effizient (kein Landverbrauch) reduziert werden (Rosa-Clot, 2020). Damit könnte

auch stärker auftretenden, **potenziell toxischen Algenblüten entgegengewirkt** werden, die auch in der Schweiz wiederholt zu Vergiftungen geführt haben (Tages-Anzeiger vom 4.8.2021).

- **Vögel scheinen durch FPV-Anlagen nicht gestört** zu werden. **Fische halten sich gerne unter und zwischen FPV-Anlagen auf** (Beschattung, spezielle Algenfauna, «Riffeffekt»), kommen so zu einem neuen Lebensraum und entziehen sich zum Teil den Fischern (Rosa-Clot, 2020).
- FPV-Anlagen haben einen **geringeren Flächenbedarf**, da deren Wirkungsgrad dank dem Kühleffekt des Wassers 11 % höher und die Wasserverdunstung 70 % kleiner ist als bei vergleichbaren Solar-kraftwerken an Land (Sahu et al., 2016).
- In einer holländischen Untersuchung stellten Mathijssen et al. (2020) nur eine **geringe Freisetzung von Schwermetallen und keinen Eintrag von organischen Mikroverunreinigungen** ins Wasser fest.

5.3.2 Nachteile

- Da FPV-Anlagen anscheinend durch Vögel nicht gemieden werden, kann es zu Problemen durch **Kotverschmutzung von Solarpanels** kommen (Rosa-Clot, 2020).
- Es bestehen noch **zahlreiche offene Fragen und Unsicherheiten**, z.B. bezüglich Wirkungsmechanismen auf die Durchmischung von Seen, möglichen negative Effekten auf die Unterwasservegetation in Flachwasserbereichen, Einflüssen auf das Phytoplankton und auf die Primärproduktion sowie auf die Nahrungsnetze in Seen im Allgemeinen.

5.4 Spezialfall Photovoltaik im alpinen Raum

Remund et al. (2019) beziffern aufgrund von Überlegungen zur Nähe von Einspeisemöglichkeiten sowie unter Weglassung von Schutzgebieten ein ausschöpfbares PV-Potential von 16.4 TWh für alpine Freiflächen in Höhenlagen zwischen 1'500 und 2'500 m ü. M.. Die Autoren weisen darauf hin, dass alpine Freiflächen-PVA den Vorteil haben, dass diese – wenn 70° oder steiler montiert – in jeder Jahreszeit praktisch gleich viel Energie produzieren und die Maximalproduktion gegen Ende Winter (Februar-März) erreicht wird, was bezüglich der Integration in das bestehende Schweizer Stromsystem vorteilhaft sei.

Die ZHAW betreibt auf der Totalp in Davos auf rund 2'500 m ü. M. eine Photovoltaik-Versuchsanlage. Messungen aus den Jahren 2018 und 2019 ergaben eine ca. 1.5 bis 2x höhere Flächeneffizienz im Vergleich zu PVA im Schweizer Mittelland (Anderegg et al., 2019). Bei Modulneigungen ab 70° kann mehr als 50 % der Energie im Winterhalbjahr produziert werden, was nebst der nebelarmen Lage vor allem auf die Schneebedeckung des umgebenden Geländes zurückzuführen sei. Den höchsten absoluten Ertrag im Winterhalbjahr verzeichneten bifaziale Module mit 70° Neigung. Während dieser Zeit konnten diese eine solch grosse Strommenge produzieren wie eine Mittelland-Anlage mit vergleichbarer Grösse während des gesamten Jahres. Im Winter ergab sich sogar ein 3 bis 3.5x höherer Stromertrag verglichen mit einer gleich grossen PVA im Mittelland (Anderegg et al., 2019).

Anlagen in offenem Gelände, wie es sie in den Nachbarländern gibt, gelten in der Schweiz wegen des Eingriffs in die Landschaft gegenwärtig noch als tabu (Tages-Anzeiger vom 3.9.2021). Mit der in Kapitel 5.2.2 erwähnten Revision der Raumplanungsverordnung (Art. 32c Abs 1 Bst c) könnten sich jedoch schon in naher Zukunft Chancen für grössere Forschungs- und Versuchsanlagen auf Freiflächen im alpinen Raum ergeben. Solche Projekte sollten von Beginn weg mit Untersuchungen zu den Auswirkungen auf die lokale Biodiversität begleitet werden. Dies ist deshalb zentral, weil die bestehenden Kenntnisse zu den Auswirkungen von Freiflächen-PVA auf Flora und Fauna (vgl. Kap. 4.2 und 4.3) nicht direkt auf die Verhältnisse im alpinen Raum appliziert werden können.

Nachfolgend werden drei Fallbeispiele von alpinen Schweizer Solaranlagen präsentiert. Die Anlagen stehen zwar nicht «auf der grünen Wiese», zeigen jedoch das Innovationspotenzial der PV im alpinen Raum.

Fallbeispiel Solaranlage Muttsee-Staumauer (GL)

An der südlich ausgerichteten Muttsee-Staumauer in den Glarner Alpen entsteht derzeit auf 2'500 m ü.M. die bisher grösste alpine Solaranlage der Schweiz. Sie ist Teil des Pumpspeicherwerks Limmern. Im Endzustand werden die fast 5'000 Solar-Module rund 10'000 m² der Staumauer bedecken und eine Leistung von rund 2.2 MW liefern (<https://www.alpinsolar.ch/ch/de/home.html>). Der Wirkungsgrad von Solarmodulen ist bei tiefen Temperaturen höher und die nebelfreie Lage führt gerade in den Winter-monaten mit grossem Energiebedarf zu relativ vielen Sonnentagen. Hinzu kommt in hohen Lagen der sogenannte «Albedo-Effekt»: Sonnenlicht wird von der Schneedecke reflektiert, was zu einer höheren Solarstrom-Produktion führt. Im Vergleich zum gesamten Kraftwerk Linth-Limmern liefert die Solaranlage an der Staumauer aber nur einen Bruchteil der Leistung: wenn alle Turbinen laufen, wird das Kraftwerk auf eine Kapazität von rund 1'540 MW kommen, was in etwa dem Kernkraftwerk Leibstadt entspricht. Die Produktionskosten für den Solarstrom sind zudem etwa doppelt so hoch wie für Solarstrom unten im Tal, nicht zuletzt wegen den hohen Kosten für die Bauarbeiten im Hochgebirge (Tages-Anzeiger vom 3.9.2021).



Solaranlage an der Muttsee-Staumauer (GL) (Visualisierung: <https://www.alpinsolar.ch>)

Fallbeispiel Lac des Toules (VS)

In den Walliser Alpen ist 2020 die weltweit erste hochgelegene schwimmende Solaranlage in Betrieb gegangen. Der Lac des Toules wird zur Erzeugung von Wasserkraft genutzt und liegt auf 1'810 m ü.M. Der schwimmende Solarpark besteht aus 1'400 Panels, die von 36 schwimmenden Aluminium- und Polyethylen-Strukturen getragen werden, welche ihrerseits im Boden verankert sind. Die Jahresproduktion erreicht mehr als 800'000 KWh. Die Verwendung von bifazialen Solarpanels ermöglicht es, das von der Wasseroberfläche reflektierte Licht zu nutzen (https://www.swissinfo.ch/ger/erneuerbare-energien_schwimmende-solarparks-weltpremiere-in-den-schweizer-alpen/46120682).



Schwimmender alpiner Solarpark auf dem Lac des Toules (VS) (Bild: <https://resources.news.e.abb.com>)

Fallbeispiel Solarskilift Tenna (GR)

2011 wurde in Tenna im Safiental (Kanton Graubünden) der weltweit erste Solarskilift in Betrieb genommen. 82 Solarwings mit je drei Panels produzieren auf einer Länge von 330 m jährlich rund 100'000 KWh Solarstrom. Die Solarwings sind auf zwei Tragseilen oberhalb des Transportseils montiert, so dass keine weiteren Stützen benötigt werden (<https://solar-skilift.ch/solarskilift/solaranlage>). Gemäss Auskunft von Jürg Rohrer, ZHAW, vom 21.10.2021 ist dieses Verfahren nur dann umsetzbar, wenn die Stützen von Anfang an auf die zusätzliche Last ausgelegt werden. Im Normalfall sei dies nachträglich nicht mehr möglich.



Solarskilift in Tenna (GR) (Bild: <https://www.surselva.info>)

5.5 Spezialfall «Solarstrassen» und «Solarzäune»

5.5.1 «Solarstrassen»

Im Knonauer Amt im Kanton Zürich ist auf 2.5 km Länge eine Überdachung der Autobahn mit Solarzellen geplant, wodurch Strom für 20'000 Haushalte produziert werden könnte (Tages-Anzeiger vom 15.7.2021).



Geplanter «Solar-Highway» im Knonauer Amt. Visualisierung: Energypier

(Quelle: <https://www.tagesanzeiger.ch/zuercher-autobahn-soll-mit-solarzellen-ueberdacht-werden-735295286313>)

Auf einigen Strassenabschnitten des *Brightlands Chemelot-Campus* in den Niederlanden werden seit August 2021 im Rahmen des Innovationsprojekts *Rolling Solar* kristalline Solarmodule als Strassenbelag verlegt. Das Produkt soll einen Ertrag von 120 kWh pro m² und Jahr liefern (https://efahrer.chip.de/news/die-autobahn-als-kraftwerk-holland-baut-erste-strassen-aus-solaranlagen_105515).

Beim Einsatz von PV-Strassen für den schweren Verkehr sehen Fachexperten ein grosses Potenzial in Dünnschichtmodulen. Diese seien zwar weniger effizient als monokristalline Solarmodule, liessen sich dafür einfacher und kostengünstiger in neue vorgefertigte oder bestehende Strassenbeläge integrieren, da man sie einfach auf die Oberfläche kleben könne (<https://www.pv-magazine.de/2021/07/28/rolling-solarfeldversuche-mit-unterschiedlichen-photovoltaik-strassen-starten>).



Solarmodule als Strassenbelag in den Niederlanden (Bild: Jonathan Vos / pv-magazine)

An seiner Sitzung vom 27. Oktober 2021 hat der Bundesrat einen Bericht verabschiedet, der aufzeigt, dass entlang von Autobahnen und Bahnstrecken insgesamt 101 GWh Solarstrom pro Jahr produziert werden könnte. Zur besseren Nutzung dieses Potenzials braucht es allerdings noch rechtliche Anpassungen (https://www.ee-news.ch/de/article/47301/bundesrat-entlang-von-autobahnen-und-bahnstrecken-konnten-101-gigawattstunden-solarstrom-produziert-werden?utm_source=newsletter1460&utm_medium=email&utm_campaign=newsletter1460).

5.5.2 «Solarzäune»

Als eine besondere Form der APV können mit Solarpanels bestückte Zäune zur Umgrenzung von Weideflächen betrachtet werden (Photovoltaic Austria, 2020). Solche fixen Zäune könnten als räumliche Gestaltungselemente auch als Abgrenzungen zwischen Grundstücken ausserhalb von Landwirtschaftsflächen genutzt werden.

Ein neuartiger, bifazialer Solarzaun aus Deutschland (*Next2Sun Mounting Systems*) ist dank ansprechendem Design geeignet für verschiedenste Anwendungsbereiche, z.B. auch als Windschutzelement (<https://www.pv-magazine.de/2021/05/21/next2sun-bringt-bifazialen-solarzaun-auf-den-markt>).



Bifazialer Solarzaun (Quelle: <https://www.next2sun.de>)

McGuigan (2009) errechnete in einem Gedankenspiel den Stromertrag von PV-Zäunen, die ein grösseres Wildtierreservat umgrenzen. Ein Schutzgebiet für 300 Tiger benötigt ca. eine Fläche von 50 km Durchmesser und würde, umgeben von einem 5 km umfassenden Ring aus PV-Panels, rund 60 GW Strom liefern.

6. Forschungsbedarf und Ausblick

6.1 Forschungsbedarf

Empirische Untersuchungen aus vielen Ländern belegen, dass Freiflächen-PVA über das Potenzial verfügen, einen wichtigen Beitrag zur Förderung der lokalen Biodiversität zu leisten. Falls für die Erstellung einer Solaranlage keine ökologisch sensiblen Lebensräume zerstört oder beeinträchtigt werden, dürften die Vorteile **für wildlebende Tiere und Pflanzen oftmals überwiegen**. Das umliegende Landwirtschaftsland könnte bei erhöhter Artenvielfalt wiederum von **verbesserten Ökosystemleistungen profitieren**, etwa einer effizienteren natürlichen Schädlingsregulation und Bestäubung von Kulturpflanzen. Voraussetzung für solche positive Effekte sind eine **naturnahe Ausgestaltung und extensive Nutzungsformen innerhalb der Freiflächen-PVA**, abgestimmt auf die naturräumlichen Gegebenheiten. Wie diese Gestaltungs- und Nutzungsformen konkret auszusehen hätten, wird nur in wenigen Studien thematisiert, und die Angaben beruhen oftmals auf qualitativen Aussagen sowie auf «grauer Literatur», z.B. allgemeinen Empfehlungen zur Förderung von Wildblumenwiesen und standorttypischen Gehölzen. Die vorliegende Literaturstudie zeigt auch auf, dass sich bis anhin die meisten Untersuchungen nur auf **einzelne bzw. einzelne wenige Freiflächen-PVA abstützen**, weshalb bestenfalls lokal bezogene Aussagen möglich sind. Zudem mangelt es oft an quantitativen Resultaten und somit an wissenschaftlicher Evidenz.

Für eine umfassende Beurteilung des Einflusses auf die Biodiversität müssten die bestehenden Studien **methodisch formalisiert**, in einen **lokalen Kontext** gebracht und dann innerhalb eines **wissenschaftlichen Rahmens** repliziert werden. Am aussagekräftigsten wären in diesem Zusammenhang **BACI-Studien** (*Before-After-Control-Impact*), damit die Situation vor Erstellung der Freiflächen-PVA als Referenzzustand erfasst und so Veränderungen während und nach Erstellung der Anlage belegt werden können. Wie ein solches Monitoring angegangen und methodisch umgesetzt werden soll, wurde im Rahmen dieser Studie nicht untersucht und müsste noch erarbeitet werden.

Aus eigener Erfahrung empfiehlt sich als Ergänzung zu den standardmässig durchgeführten **Vegetationsaufnahmen** der Einbezug von **Indikator-Insektengruppen**, da jene dank kurzer Generationszeiten und oftmals klar definierter Lebensraumsprüche **spezifisch und rasch auf Umweltveränderungen reagieren**. Als Indikatoren für Ökosystemleistungen bieten sich beispielsweise Wildbienen (Bestäubung), Schwebfliegen (Bestäubung, Larven z.T. für natürliche Schädlingsregulation) und Laufkäfer (natürliche Schädlingsregulation) an. Tagfalter (tagaktive Schmetterlinge) würden sich wiederum als Indikatoren zur Bewertung verschiedener Nutzungsformen und -intensitäten anbieten, Heuschrecken als Indikatoren für die mikroklimatische Vielfalt eines Standorts. Insekten wären für ein solches Monitoring auch deshalb geeignet, weil sie in der Schweiz einem alarmierenden Rückgang in der Kulturlandschaft unterliegen und deshalb besonders förderungswürdig sind (Akademien der Wissenschaften Schweiz 2019). **Da aus dem alpinen Raum keine wissenschaftlichen Untersuchungen zu den Auswirkungen von Freiflächen-PVA auf die lokale Biodiversität von Grünflächen vorliegen, wären diesbezügliche Projekte besonders begrüssenswert.**

6.2 Ausblick

Wie in diesem Bericht erläutert, stehen Freiflächen-PVA «auf der grünen Wiese» nicht nur vor hohen **raumplanerischen Hürden**, sondern auch vor massiven betriebswirtschaftlichen Hindernissen: Da Freiflächen-PVA explizit nicht zur landwirtschaftlichen Nutzfläche gehören, ist Landwirtschaftsland unter Agrophotovoltaik-Anlagen **im Rahmen des geltenden Rechts nicht direktzahlungsberechtigt**. Dies obschon ein naturverträglicher Ausbau von Freiflächen-PV zu einer **Bereicherung der ökologischen Infrastruktur** führen könnte.

Inwiefern die aktuell sehr restriktive Bewilligungspraxis zielführend ist oder angepasst werden sollte, müsste in einem **breit abgestützten politischen Dialog** diskutiert und geklärt werden. Dass auch seitens biologischer Landwirtschaft Diskussionsbereitschaft für eine Kombination von landwirtschaftlicher Nutzfläche und PV besteht, zeigt eine aktuelle Stellungnahme von Knut Schmidtke, dem neuen Direktor des *Forschungsinstituts für biologischen Landbau FIBL*. Er schlägt explizit vor, auch über eine PV-Nutzung auf Grün- und Ackerland nachzudenken und nicht nur über eine solche auf Dächern (NZZ am Sonntag vom 26.9.2021).

Swissolar schlägt in einer aktuellen Stellungnahme zur Teilrevision des *Raumplanungsgesetzes (RPG)* vor, die Verfügbarkeit von Stellflächen abseits von Dächern und Fassaden zu vereinfachen. Unter ande-

rem soll die **Regelung für die Energieerzeugung ausserhalb der Bauzone oder in der Landwirtschaftszone vereinheitlicht werden**. Dazu soll im *RPG* geklärt werden, unter welchen Bedingungen Freiflächen-PVA landwirtschaftszonenkonform sind bzw. einer Ausnahmegewilligung unterstehen. Heute bestünden in diesem Zusammenhang noch Unsicherheiten, da die erneuerbaren Energien PV und Biomasse im Gesetz unterschiedlich privilegiert würden (<https://www.energate-messenger.ch/news/215346/swissolar-will-verfuegbarkeit-von-stellflaechen-vereinfachen>).

Im angewandten Naturschutz hat sich wiederholt gezeigt, dass durch eine geschickte Auswahl von **Sym-
pathieträgern als Aushängeschilder** («Flaggschiffarten») oder durch den Einbezug von Tier- und Pflanzen-Arten mit speziellen Lebensweisen die Akzeptanz eines Vorhabens bei Entscheidungsträgern und in der breiten Bevölkerung gesteigert werden kann. Diese können dann gegebenenfalls für das ganze Vorhaben stehen: In einem Projekt bei Wien war dies der Feldhamster, bei Projekten in Dänemark der Kiebitz und in einem Solarpark im deutschen Crailsheim die Blauflügelige Ödlandschrecke (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2019).

Die Förderung von Freiflächen-PVA eröffnet die Möglichkeit, **Energie- und Klimaschutzziele mit den Anliegen des Naturschutzes in Einklang zu bringen** und könnte dank dem allgemein positiven Image der Solarenergie wichtige Impulse für die angestrebte Energiewende liefern. Eine breit angelegte **Informationskampagne** zum Thema Freiflächen-PVA in der Publikumspressen, bei Fachverbänden und weiteren involvierten Kreisen könnte zur erwünschten Versachlichung der Diskussion beitragen und den Weg für erste PV-Forschungsanlagen auf Schweizer Grünflächen ebnen.

7. Literatur und Referenzen

- Adeh, Elnaz H., Good, S. P., Calaf, M., & Higgins, C. W. (2019). Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands. *Scientific Reports*, *9*(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47803-3>
- Adeh, Elnaz Hassanpour, Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*, *13*(11), e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Agha, M., Lovich, J. E., Ennen, J. R., & Todd, B. D. (2020). Wind, sun, and wildlife: Do wind and solar energy development 'short-circuit' conservation in the western United States? *Environmental Research Letters*, *15*(7), 075004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8846>
- Akademien der Wissenschaften Schweiz (2019). *Insektenschwund in der Schweiz und mögliche Folgen für Gesellschaft und Wirtschaft*.
- AL-agele, H. A., Proctor, K., Murthy, G., & Higgins, C. (2021). A Case Study of Tomato (*Solanum lycopersicon* var. Legend) Production and Water Productivity in Agrivoltaic Systems. *Sustainability*, *13*(5), 2850. <https://doi.org/10.3390/su13052850>
- Albrecht, M., Schmid, B., Hautier, Y., & Müller, C. B. (2012). Diverse pollinator communities enhance plant reproductive success. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, *279*(1748), 4845–4852. <https://doi.org/10.1098/rspb.2012.1621>
- Anderegg, D., Strelbel, S., & Rohrer, J. (2019). Messergebnisse Juni 2018 bis Mai 2019 Versuchsanlage Totalp. Forschungsgruppe Erneuerbare Energien, IUNR Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen, ZHAW, Wädenswil. <https://digitalcollection.zhaw.ch/handle/11475/20369>
- Armstrong, A., Ostle, N. J., & Whitaker, J. (2016). Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters*, *11*(7), 074016. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>
- Assouline, D., Mohajeri, N., & Scartezzini, J.-L. (2017). Quantifying rooftop photovoltaic solar energy potential: A machine learning approach. *Solar Energy*, *141*, 278–296. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.11.045>
- Babayigit, A., Duy Thanh, D., Ethirajan, A., Manca, J., Muller, M., Boyen, H.-G., & Conings, B. (2016). Assessing the toxicity of Pb- and Sn-based perovskite solar cells in model organism *Danio rerio*. *Scientific Reports*, *6*(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/srep18721>
- Badelt, O., Niepelt, R., Wiehe, J., Matthies, S., Gewohn, T., Stratmann, M., ... von Haaren, C. (2020). *Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE)*. Auftraggeber: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz.

- Barron-Gafford, G. A., Minor, R. L., Allen, N. A., Cronin, A. D., Brooks, A. E., & Pavao-Zuckerman, M. A. (2016). The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures. *Scientific Reports*, 6(1), 1–7. <https://doi.org/10.1038/srep35070>
- Barron-Gafford, G. A., Pavao-Zuckerman, M. A., Minor, R. L., Sutter, L. F., Barnett-Moreno, I., Blackett, D. T., ... Macknick, J. E. (2019). Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. *Nature Sustainability*, 2(9), 848–855. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0364-5>
- Beatty, B., Macknick, J., McCall, J., Braus, G., & Buckner, D. (2017). *Native Vegetation Performance under a Solar PV Array at the National Wind Technology Center* (Nr. NREL/TP--1900-66218, 1357887; S. NREL/TP--1900-66218, 1357887). <https://doi.org/10.2172/1357887>
- BenGhida, D., & BenGhida, S. (2019). *Investment in Agrophotovoltaics: Efficient Solutions from Switzerland*. <https://doi.org/10.35940/ijitee.I2497.1081219>
- Bernáth, B., Szedenics, G., Molnár, G., Kriska, G., & Horváth, G. (2001). Visual ecological impact of a peculiar waste oil lake on the avifauna: Dual-choice field experiments with water-seeking birds using huge shiny black and white plastic sheets. *Arch Nature Conserv Landsc Res*, 40, 1–28.
- Bevk, T., & Golobič, M. (2020). Contentious eye-catchers: Perceptions of landscapes changed by solar power plants in Slovenia. *Renewable Energy*, 152, 999–1010. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.108>
- Biesmeijer, D. K., van Kolfshoten, L., Wit, D. F., & Moens, M. (2020). *The effects of solar parks on plants and pollinators: The case of Shell Moerdijk*. 28.
- Blaydes, H., Potts, S. G., Whyatt, J. D., & Armstrong, A. (2021). Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 145, 111065. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111065>
- Bosch, S., & Peyke, G. (2011). Gegenwind für die Erneuerbaren – Räumliche Neuorientierung der Wind-, Solar- und Bioenergie vor dem Hintergrund einer verringerten Akzeptanz sowie zunehmender Flächennutzungskonflikte im ländlichen Raum. *Raumforschung und Raumordnung*, 69(2), 105–118. <https://doi.org/10.1007/s13147-011-0082-6>
- Bruce, B. (2019). *The surprising symbiosis behind responsibly developed Utility-Scale Solar Sites*. RP Construction Services.
- Brunet, C., Savadogo, O., Baptiste, P., Bouchard, M. A., Rakotoary, J. C., Ravoninjatovo, A., ... Merveille, N. (2020). Impacts Generated by a Large-Scale Solar Photovoltaic Power Plant Can Lead to Conflicts between Sustainable Development Goals: A Review of Key Lessons Learned in Madagascar. *Sustainability*, 12(18), 7471. <https://doi.org/10.3390/su12187471>
- Bucher, C., & Schwarz, R. (2019). *Studie Winterstrom Schweiz - Was kann die heimische Photovoltaik beitragen?* Energie Schweiz, Bundesamt für Energie (BFE) [Hrsg.]
- Bundesamt für Energie (BFE) (2018). *Energiestrategie 2050 nach dem Inkrafttreten des neuen Energiegesetzes*. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/politik/energiestrategie-2050.html>

- Bundesamt für Energie (BFE) (2020). *Energiestrategie 2050 Monitoring-Bericht 2020 inkl. Kurzfassung*. <https://www.bfe.admin.ch/bfe/de/home/versorgung/statistik-und-geodaten/monitoring-energiestrategie-2050.html>
- Bundesamt für Landwirtschaft (BLW) (2020). *Agrarbericht 2020*. <https://www.agrarbericht.ch/de/politik/direktzahlungen/biodiversitaetsbeitraege>
- Bundesamt für Statistik (BFS) (2021). *Umwelt Taschenstatistik 2021*.
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2017a). *Aktionsplan Strategie Biodiversität Schweiz*. Vom Bundesrat am 06.09.2017 genehmigt
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2017b). Biodiversität in der Schweiz: Zustand und Entwicklung. Ergebnisse des Überwachungssystems im Bereich Biodiversität, Stand 2016. Umwelt-Zustand Nr. 1630
- Bundesamt für Umwelt (BAFU) (2021). *Zustand der Lebensräume in der Schweiz*. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/biodiversitaet/fachinformationen/zustand-der-biodiversitaet-in-der-schweiz/zustand-der-lebensraeume-in-der-schweiz.html>
- Chang, Y.-H., Ku, C.-R., & Lu, H.-L. (2014). Effects of aquatic ecological indicators of sustainable green energy landscape facilities. *Ecological engineering*, 71, 144–153.
- Chock, R. Y., Clucas, B., Peterson, E. K., Blackwell, B. F., Blumstein, D. T., Church, K., ... Toni, P. (2021). Evaluating potential effects of solar power facilities on wildlife from an animal behavior perspective. *Conservation Science and Practice*, 3(2). <https://doi.org/10.1111/csp2.319>
- Choi, C. S., Cagle, A. E., Macknick, J., Bloom, D. E., Caplan, J., & Ravi, S. (2020). *Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure*. <https://doi.org/10.34944/dspace/1110>
- Conkling, T. J., Loss, S. R., Diffendorfer, J. E., Duerr, A. E., & Katzner, T. E. (2021). Limitations, lack of standardization, and recommended best practices in studies of renewable energy effects on birds and bats. *Conservation Biology*, 35(1), 64–76. <https://doi.org/10.1111/cobi.13457>
- Cook Lauren M., & McCuen Richard H. (2013). Hydrologic Response of Solar Farms. *Journal of Hydrologic Engineering*, 18(5), 536–541. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000530](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000530)
- Csencsics, D., Aavik, T., Hedinger, C., Holderegger, R., Home, R., Keller, D., ... Bolliger, J. (2014). Lebensraumvernetzung in der Agrarlandschaft. *Eidgen. Forschungsanstalt WSL, Merkblatt Praxis*, 53.
- Demuth, B., Maack, A., Schumacher, J., Süßbier, D., Deutschland, Bundesamt für Naturschutz, ... Technische Universität Berlin. (2019). *Photovoltaik-Freiflächenanlagen Planung und Installation mit Mehrwert für den Naturschutz*. Berlin: Bundesamt für Naturschutz (BfN).
- DeVault, T. L., Seamans, T. W., Schmidt, J. A., Belant, J. L., Blackwell, B. F., Mooers, N., ... Van Pelt, L. (2014). Bird use of solar photovoltaic installations at US airports: Implications for aviation safety. *Landscape and Urban Planning*, 122, 122–128. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2013.11.017>

- Dhar, A., Naeth, M. A., Jennings, P. D., & Gamal El-Din, M. (2020). Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. *Science of The Total Environment*, 718, 134602. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134602>
- DIN SPEC 91434 (2021). Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung. DIN Deutsches Institut für Normung e. V.
- Dupraz, C., Marrou, H., Talbot, G., Dufour, L., Nogier, A., & Ferard, Y. (2011). Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy*, 36(10), 2725–2732. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.005>
- Dwyer, J. F., Landon, M. A., & Mojica, E. K. (2018). Impact of Renewable Energy Sources on Birds of Prey. In J. H. Sarasola, J. M. Grande, & J. J. Negro (Hrsg.), *Birds of Prey* (S. 303–321). https://doi.org/10.1007/978-3-319-73745-4_13
- Ebert, T., & Müller, C. (2011). Schadstoffe in Photovoltaik – Freiflächenanlagen. *Bodenschutz*, (3), 4. <https://doi.org/10.37307/j.1868-7741.2011.03.04>
- Elamri, Y., Cheviron, B., Lopez, J.-M., Dejean, C., & Belaud, G. (2018). Water budget and crop modelling for agrivoltaic systems: Application to irrigated lettuces. *Agricultural Water Management*, 208, 440–453. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2018.07.001>
- Exley, G. (2021). Floating solar farms could cool down lakes threatened by climate change. Abgerufen 27. August 2021, von The Conversation website: <http://theconversation.com/floating-solar-farms-could-cool-down-lakes-threatened-by-climate-change-157987>
- Exley, G., Armstrong, A., Page, T., & Jones, I. D. (2021). Floating photovoltaics could mitigate climate change impacts on water body temperature and stratification. *Solar Energy*. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.076>
- Fartmann, T., Jedicke, E., Streitberger, M., & Stuhldreher, G. (2021). *Insektensterben in Mitteleuropa: Ursachen und Gegenmaßnahmen*.
- Fartmann, T., Stuhldreher, G., Streitberger, M., & Helbing, F. (2021). Die Bedeutung der Habitatqualität für den Schutz der Insektendiversität—Mikroklima, Phytodiversität, Habitatheterogenität und Totholz sind Schlüsselfaktoren für artenreiche Insektengemeinschaften. *Naturschutz und Landschaftsplanung (NuL)*, 53(7), 12–17. <https://doi.org/10.1399/NuL.2021.07.01>
- Fechner, H. (2020). *Ermittlung des Flächenpotentials für den Photovoltaik-Ausbau in Österreich: Welche Flächenkategorien sind für die Erschließung von besonderer Bedeutung, um das Ökostromziel realisieren zu können* (S. 69) [Studie im Auftrag von Österreichs Energie]. Wien.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme. (2020). *Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende* (S. 56) [Leitfaden für Deutschland]. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

- Fritz, B., Horváth, G., Hünig, R., Pereszlényi, Á., Egri, Á., Guttman, M., ... Gomard, G. (2020). Bioreplicated coatings for photovoltaic solar panels nearly eliminate light pollution that harms polarotactic insects. *PLOS ONE*, 15(12), e0243296. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243296>
- Fthenakis, V., Blunden, J., Green, T., Krueger, L., & Turney, D. (2011). Large photovoltaic power plants: Wildlife impacts and benefits. *2011 37th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 002011–002016. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2011.6186348>
- Gehrlein, U., Mengel, A., Milz, E., Hoheisel, D., Barthelmes, B., Düsterhaus, B., ... Schubert, S. (2017). *Nationale Naturlandschaften (NNL) und erneuerbare Energien. Gesamtbericht. Band 1* (482. Aufl.). Abgerufen von <https://doi.org/10.19217/skr482>
- George, G., Kanavas, X., & Zissopoulos, D. (2013). *ADAM, Intelligent integrated self-enhanced photovoltaic panel with rainwater harvesting for irrigation, unit cooling and cleaning* (G. M. Papadourakis, Hrsg.). New York: Ieee.
- Graham, M., Ates, S., Melathopoulos, A. P., Moldenke, A. R., DeBano, S. J., Best, L. R., & Higgins, C. W. (2021). Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Scientific Reports*, 11(1), 7452. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4>
- Greif, S., Zsebök, S., Schmieder, D., & Siemers, B. M. (2017). Acoustic mirrors as sensory traps for bats. *Science*. Abgerufen von <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.aam7817>
- Guiller, C., Affre, L., Deschamps-Cottin, M., Geslin, B., Kaldonski, N., & Tatoni, T. (2017). Impacts of solar energy on butterfly communities in mediterranean agro-ecosystems. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 36(6), 1817–1823. <https://doi.org/10.1002/ep.12626>
- Günnewig, D., Sieben, A., Püschel, M., Bohl, J., & Mack, M. (2007). *Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen* (S. 126). Hannover: Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Bearbeitung durch ARGE Monitoring PV-Anlagen.
- Guntern, J., Suhner, M., Neumann P., Müller, A. (2014). *Bienen und andere Bestäuber: Bedeutung für Landwirtschaft und Biodiversität*. Swiss Academies Factsheets 9 (1).
- Harrison, C., Lloyd, H., & Field, C. (2016). *Evidence review of the impact of solar farms on birds, bats and general ecology*. Manchester Metropolitan University.
- Heindl, M. (2016). Brutbestandsentwicklung von Braunkehlchen *Saxicola rubetra* und Grauammer *Emberiza calandra* auf einer Photovoltaik-Freiflächenanlage bei Demmin. *Ornithol. Rundbr. Mecklenbg.-Vorpomm.*, 48(3), 303–307.
- Herden, C., Rasmus, J., & Gharadjedaghi, B. (2009). *Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen* (S. 195) [BfN-Skript]. Bonn: Bundesamt für Naturschutz.

- Hernandez, R. R., Easter, S. B., Murphy-Mariscal, M. L., Maestre, F. T., Tavassoli, M., Allen, E. B., ... Allen, M. F. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 766–779. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>
- Horica, S. (2021). *Photovoltaik im Weinbau – eine Potenzialabschätzung*. Bachelorarbeit ZHAW Wädenswil.
- Horváth, G., Blahó, M., Egri, Á., Kriska, G., Seres, I., & Robertson, B. (2010). Reducing the Maladaptive Attractiveness of Solar Panels to Polarotactic Insects. *Conservation Biology*, 24(6), 1644–1653. <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2010.01518.x>
- Horváth, G., Pereszlényi, Á., Egri, Á., Fritz, B., Guttmann, M., Lemmer, U., ... Kriska, G. (2020). Horsefly reactions to black surfaces: Attractiveness to male and female tabanids versus surface tilt angle and temperature. *Parasitology Research*, 119(8), 2399–2409. <https://doi.org/10.1007/s00436-020-06702-7>
- Hostettler, T. & Hekler, A. (2021). *Statistik Sonnenenergie. Referenzjahr 2020*. Hrsg. Bundesamt für Energie (BFE)
- Jäger, M. (2021). *Agro-Photovoltaik in der Schweizer Landwirtschaft: Machbarkeitsstudie untersucht Potenziale und Risiken*. IUNR Magazin 2021(1). <https://doi.org/10.21256/zhaw-22658>
- Ketzer, D., Weinberger, N., Rösch, C., & Seitz, S. B. (2020). Land use conflicts between biomass and power production – citizens' participation in the technology development of Agrophotovoltaics. *Journal of Responsible Innovation*, 7(2), 193–216. <https://doi.org/10.1080/23299460.2019.1647085>
- Kim, J. Y., Koide, D., Ishihama, F., Kadoya, T., & Nishihiro, J. (2021). Current site planning of medium to large solar power systems accelerates the loss of the remaining semi-natural and agricultural habitats. *Science of The Total Environment*, 146475. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146475>
- Kitt, M. (2020). *Vorhabenbezogener B-Plan "Photovoltaik-Freiflächenanlage an der Bahnlinie" in Winden* (S. 23) [Artenschutzrechtlicher Beitrag zu Bebauungsplan]. Minfeld: Im Auftrag der Ortsgemeinde Winden.
- Kosciuch, K., Riser-Espinoza, D., Geringer, M., & Erickson, W. (2020). A summary of bird mortality at photovoltaic utility scale solar facilities in the Southwestern U.S. *PLOS ONE*, 15(4), e0232034. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232034>
- Lammerant, L., Laureysens, I. and Driesen, K. (2020). *Potential impacts of solar, geothermal and ocean energy on habitats and species protected under the Birds and Habitats Directives*. Final report under EC Contract ENV.D.3/SER/2017/0002.
- Lieder, K., & Lumpe, J. (2011). *Vögel im Solarpark – eine Chance für den Artenschutz?* Abgerufen von <http://archiv.windenergietage.de/20F3261415.pdf>
- Lovich, J. E., & Ennen, J. R. (2013). Assessing the state of knowledge of utility-scale wind energy development and operation on non-volant terrestrial and marine wildlife. *Applied Energy*, 103, 52–60. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.10.001>

- Maia, A. S. C., Culhari, E. de A., Fonsêca, V. de F. C., Milan, H. F. M., & Gebremedhin, K. G. (2020). Photovoltaic panels as shading resources for livestock. *Journal of Cleaner Production*, 258, 120551. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120551>
- Makaronidou, M. (2020). *Assessment on the local climate effects of solar parks*. 5604481 B, 237 pages. <https://doi.org/10.17635/LANCASTER/THESIS/1019>
- Marrou, H., Wéry, J., Dufour, L., & Dupraz, C. (2013). Productivity and radiation use efficiency of lettuces grown in the partial shade of photovoltaic panels. *European Journal of Agronomy*, 44, 54–66.
- Mathijssen, D., Hofs, B., Spierenburg-Sack, E., van Asperen, R., van der Wal, B., Vreeburg, J., & Ketelaars, H. (2020). Potential impact of floating solar panels on water quality in reservoirs; pathogens and leaching. *Water Practice and Technology*, 15(3), 807–811. <https://doi.org/10.2166/wpt.2020.062>
- McCoshum, S. M., & Geber, M. A. (2020). Land Conversion for Solar Facilities and Urban Sprawl in Southwest Deserts Causes Different Amounts of Habitat Loss for Ashmeadiella Bees. *Journal of the Kansas Entomological Society*, 92(2), 468–478. <https://doi.org/10.2317/0022-8567-92.2.468>
- McGuigan, M. (2009). The Tiger and the Sun: Solar Power Plants and Wildlife Sanctuaries. *arXiv:0902.4692 [physics, q-bio]*. Abgerufen von <http://arxiv.org/abs/0902.4692>
- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. (2019). *Handlungsleitfaden Freiflächensolaranlagen* (S. 84) [Handlungsleitfaden]. Stuttgart: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.
- Miskin, C. K., Li, Y., Perna, A., Ellis, R. G., Grubbs, E. K., Bermel, P., & Agrawal, R. (2019). Sustainable co-production of food and solar power to relax land-use constraints. *Nature Sustainability*, 2(10), 972–980. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0388-x>
- Monnerat, C., Thorens, P., Walter, T., & Gonseth, Y. (2007). *Rote Liste Heuschrecken*. Bern und Neuenburg: BAFU und CSCF.
- Montag, H., Parker, D. G., & Clarkson, T. (2016). The Effects of Solar Farms on Local Biodiversity. A comparative Study. *Clarkson and Woods and Wychwood Biodiversity*.
- Moore-O'Leary, K. A., Hernandez, R. R., Johnston, D. S., Abella, S. R., Tanner, K. E., Swanson, A. C., ... Lovich, J. E. (2017). Sustainability of utility-scale solar energy – critical ecological concepts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(7), 385–394. <https://doi.org/10.1002/fee.1517>
- Motta, C. M., Cerciello, R., De Bonis, S., Mazzella, V., Cirino, P., Panzuto, R., ... Trifuoggi, M. (2016). Potential toxicity of improperly discarded exhausted photovoltaic cells. *Environmental Pollution*, 216, 786–792.
- NABU, & BSW Solar. (2021). *Kriterien für naturverträgliche Photovoltaik-Freiflächenanlagen* (S. 8) [Gemeinsames Papier]. Berlin: BSW - Bundesverband Solarwirtschaft e. V.; NABU - Naturschutzbund Deutschland e. V.

- Nematchoua, M. K., Asadi, S., & Reiter, S. (2020). Influence of energy mix on the life cycle of an eco-neighborhood, a case study of 150 countries. *Renewable Energy*, 162, 81–97. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.141>
- Northrup, J. M., & Wittemyer, G. (2013). Characterising the impacts of emerging energy development on wildlife, with an eye towards mitigation. *Ecology Letters*, 16(1), 112–125. <https://doi.org/10.1111/ele.12009>
- Owens, A. C. S., Cochard, P., Durrant, J., Farnworth, B., Perkin, E. K., & Seymoure, B. (2020). Light pollution is a driver of insect declines. *Biological Conservation*, 241, 108259. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2019.108259>
- Parker, G.E. & McQueen, C. (2013). *Can Solar Farms Deliver Significant Benefits to Biodiversity?* Preliminary Study July-August 2013. Unpublished Report.
- Pereszlényi, Á., Horváth, G., & Kriska, G. (2017). Atypical feeding of woodpeckers, crows and redstarts on mass-swarming *Hydropsyche pellucidula* caddisflies attracted to glass panes. *Urban Ecosystems*, 20(6), 1203–1207. <https://doi.org/10.1007/s11252-017-0672-3>
- Pérez-de-los-Reyes, C., Ormeño, M. S., Ortíz-Villajos, J. Á. A., Navarro, F. J. G., Gallego, J. C., López, R. M., & Berenguer, F. R. (2013). Revegetation in solar photovoltaic farms in mediterranean areas. *Fresenius Environmental Bulletin*, 22(12), 9.
- Peschel, R., Peschel, T., Marchand, M., & Hauke, J. (2019). *Solarparks—Gewinne für die Biodiversität* (S. 73) [Studie]. Bundesverband Neue Energiewirtschaft (bne) e.V.
- Photovoltaic Austria. (2020). *Photovoltaik-Nutzung in der Landwirtschaft* (S. 32) [Informationsbroschüre]. Abgerufen von Bundesverband Photovoltaic Austria website: <https://pvaustria.at/wp-content/uploads/2020-Informationsbroschuere-Photovoltaik-Nutzung-in-der-Landwirtschaft-1.pdf>
- Piasecka, I., Bałdowska-Witos, P., Piotrowska, K., & Tomporowski, A. (2020). Eco-Energetical Life Cycle Assessment of Materials and Components of Photovoltaic Power Plant. *Energies*, 13(6), 1385. <https://doi.org/10.3390/en13061385>
- Raab, B. (2015). Erneuerbare Energien und Naturschutz—Solarparks können einen Beitrag zur Stabilisierung der biologischen Vielfalt leisten. *Anliegen Natur*, (Heft 37(1)), 11.
- Rehbein, J. A., Watson, J. E. M., Lane, J. L., Sonter, L. J., Venter, O., Atkinson, S. C., & Allan, J. R. (2020). Renewable energy development threatens many globally important biodiversity areas. *Global Change Biology*, 26(5), 3040–3051. <https://doi.org/10.1111/gcb.15067>
- Remund, J., Albrecht, S., & Stickelberger, D. (2019). *Das Schweizer PV-Potenzial basierend auf jedem Gebäude*. Meteotest und Swissolar.
- Riedl, U., Stemmer, B., Philipper, S., Peters, W., Schicketanz, S., Thylmann, M., ... Moczek, N. (2020). *Szenarien für den Ausbau der erneuerbaren Energien aus Naturschutzsicht* (BfN-Skript Nr. 570; S. 284). Abgerufen von Bundesamt für Naturschutz, Konstantinstr. 110, 53179 Bonn website: <https://www.bfn.de/fileadmin/BfN/service/Dokumente/skripten/Skript570.pdf>

- Rohrer, J. (2020). Ausbau der Stromproduktion aus Photovoltaik in der Schweiz: Bedarf, Potential und Umsetzung. *Schriftenreihe Erneuerbare Energien, Bodenökologie und Ökotechnologie*, Herausgeber: ZHAW Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften. <https://doi.org/10.21256/ZHAW-2654>
- Rosa-Clot, P. (2020). Chapter 9—FPV and Environmental Compatibility. In M. Rosa-Clot & G. Marco Tina (Hrsg.), *Floating PV Plants* (S. 101–118). <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817061-8.00009-9>
- Rösch, C. (2016). Agrophotovoltaik - die Energiewende in der Landwirtschaft. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 25(4), 242–246. <https://doi.org/10.14512/gaia.25.4.5>
- Sahu, A., Yadav, N., & Sudhakar, K. (2016). Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 66, 815–824. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.08.051>
- Schalow, L. E. (2013). *Schafbeweidung in Solarparks in Deutschland* (S. 141) [Masterarbeit]. Abgerufen von Universität Potsdam. Institut für Biochemie und Biologie. Masterstudiengang: Ökologie, Evolution & Naturschutz website: https://lelf.brandenburg.de/sixcms/media.php/9/Masterarbeit_Schalow.pdf
- Sánchez Molina, P. (2021). *Spanish solar parks hosting 13 million bees*. pv magazine. <https://www.pv-magazine.com/2021/05/21/spanish-solar-parks-hosting-13-million-bees/>
- Scheller, W., Mika, F., & Köpke, G. (2020). *Studie zu Auswirkungen von Photovoltaik-Anlagen auf Schreiadlerlebensräume* (S. 35) [Expertise (Auftraggeber: BAUKONZEPT Neubrandenburg GmbH)]. Teterow: SALIX-Büro für Umwelt- und Landschaftsplanung.
- Schindler, B. Y., Blaustein, L., Lotan, R., Shalom, H., Kadas, G. J., & Seifan, M. (2018). Green roof and photovoltaic panel integration: Effects on plant and arthropod diversity and electricity production. *Journal of Environmental Management*, 225, 288–299. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.08.017>
- Schlegel, J., & Rupf, R. (2010). Attitudes towards potential animal flagship species in nature conservation: A survey among students of different educational institutions. *Journal for Nature Conservation*, 18(4), 278–290. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2009.12.002>
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2019). *Verordnung über landwirtschaftliche Begriffe und die Anerkennung von Betriebsformen (Landwirtschaftliche Begriffsverordnung, LBV)* vom 7. Dezember 1998 (Stand am 1. Januar 2019). 910.91
- Schweizerische Eidgenossenschaft (2021). *Verordnung über die Direktzahlungen an die Landwirtschaft (Direktzahlungsverordnung, DZV)* vom 23. Oktober 2013 (Stand am 5. Juli 2021). 910.13
- Schweizerischer Bundesrat (2021). *Botschaft zum Bundesgesetz über eine sichere Stromversorgung mit erneuerbaren Energien*. Verabschiedete provisorische Fassung vom 18.6.2021. <https://www.admin.ch/gov/de/start/dokumentation/medienmitteilungen.msg-id-84018.html>
- Semeraro, T., Aretano, R., Barca, A., Pomes, A., Del Giudice, C., Gatto, E., ... Scognamiglio, A. (2020). A Conceptual Framework to Design Green Infrastructure: Ecosystem Services as an Opportunity for Creating Shared Value in Ground Photovoltaic Systems. *Land*, 9(8), 238. <https://doi.org/10.3390/land9080238>

- Semeraro, T., Pomes, A., Del Giudice, C., Negro, D., & Aretano, R. (2018). Planning ground based utility scale solar energy as green infrastructure to enhance ecosystem services. *Energy Policy*, *117*, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.050>
- Sharpe, K. T., Heins, B. J., Buchanan, E. S., & Reese, M. H. (2021). Evaluation of solar photovoltaic systems to shade cows in a pasture-based dairy herd. *Journal of Dairy Science*, *104*(3), 2794–2806. <https://doi.org/10.3168/jds.2020-18821>
- Sinha, P., Hoffman, B., Sakers, J., & Althouse, L. (2018). Best Practices in Responsible Land Use for Improving Biodiversity at a Utility-Scale Solar Facility. *Case Studies in the Environment*, *2*(1). <https://doi.org/10.1525/cse.2018.001123>
- Sjödín, N. E., Bengtsson, J., & Ekblom, B. (2008). The influence of grazing intensity and landscape composition on the diversity and abundance of flower-visiting insects. *Journal of Applied Ecology*, *45*(3), 763–772. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2007.01443.x>
- Sreenath, S., Sudhakar, K., & Yusop, A. F. (2020). Solar photovoltaics in airport: Risk assessment and mitigation strategies. *Environmental Impact Assessment Review*, *84*, 106418. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2020.106418>
- Suuronen, A., Muñoz-Escobar, C., Lensu, A., Kuitunen, M., Guajardo Celis, N., Espinoza Astudillo, P., ... Kukkonen, J. V. K. (2017). The Influence of Solar Power Plants on Microclimatic Conditions and the Biotic Community in Chilean Desert Environments. *Environmental Management*, *60*(4), 630–642. <https://doi.org/10.1007/s00267-017-0906-4>
- Száz, D., Mihályi, D., Farkas, A., Egri, Á., Barta, A., Kriska, G., ... Horváth, G. (2016). Polarized light pollution of matte solar panels: Anti-reflective photovoltaics reduce polarized light pollution but benefit only some aquatic insects. *Journal of Insect Conservation*, *20*(4), 663–675. <https://doi.org/10.1007/s10841-016-9897-3>
- Tammaro, M., Salluzzo, A., Rimauro, J., Schiavo, S., & Manzo, S. (2016). Experimental investigation to evaluate the potential environmental hazards of photovoltaic panels. *Journal of Hazardous Materials*, *306*, 395–405. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2015.12.018>
- Tanner, K., Molina-Menor, E., Latorre-Pérez, A., Vidal-Verdú, À., Vilanova, C., Peretó, J., & Porcar, M. (2020). Extremophilic microbial communities on photovoltaic panel surfaces: A two-year study. *Microbial Biotechnology*, *13*(6), 1819–1830. <https://doi.org/10.1111/1751-7915.13620>
- Taylor, R., Conway, J., Gabb, O. & Gillespie, J. (2019). *Potential ecological impacts of groundmounted photovoltaic solar panels*. http://www.bsg-ecology.com/wp-content/uploads/2015/01/Solar-panels-and-wildlife-review_RT_FINAL_140109.pdf
- Thomas, K. A., Jarchow, C. J., Arundel, T. R., Jamwal, P., Borens, A., & Drost, C. A. (2018). Landscape-scale wildlife species richness metrics to inform wind and solar energy facility siting: An Arizona case study. *Energy Policy*, *116*, 145–152. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.052>

- Touil, S., Richa, A., Fizir, M., & Bingwa, B. (2021). Shading effect of photovoltaic panels on horticulture crops production: A mini review. *Reviews in Environmental Science and Bio-Technology*, 20(2), 281–296. <https://doi.org/10.1007/s11157-021-09572-2>
- Tröltzsch, P., & Neuling, E. (2013). Die Brutvögel großflächiger Photovoltaikanlagen in Brandenburg. *Vogelwelt*, (134), 155–179.
- Trommsdorff, M., Kang, J., Reise, C., Schindele, S., Bopp, G., Ehmann, A., ... Obergfell, T. (2021). Combining food and energy production: Design of an agrivoltaic system applied in arable and vegetable farming in Germany. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 140, 110694. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110694>
- Tschumi, M., Albrecht, M., Entling, M. H., & Jacot, K. (2015). High effectiveness of tailored flower strips in reducing pests and crop plant damage. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 282(1814), 20151369. <https://doi.org/10.1098/rspb.2015.1369>
- Turney, D., & Fthenakis, V. (2011). Environmental impacts from the installation and operation of large-scale solar power plants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(6), 3261–3270. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.04.023>
- Uldrijan, D., Kováčiková, M., Jakimiuk, A., Vaverková, M. D., & Winkler, J. (2021). Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants. *Ecological Engineering*, 168, 106274. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106274>
- van der Kolk, H.-J., van den Berg, P., Korthals, G., & Bezemer, T. M. (2020). Shading enhances plant species richness and diversity on an extensive green roof. *Urban Ecosystems*, 23(5), 935–943. <https://doi.org/10.1007/s11252-020-00980-w>
- van der Zee, F., Bloem, J., Galama, P., Gollenbeek, L., van Os, J., Schotman, A., ... de Vries, S. (2019). *Zonneparken natuur en landbouw*. <https://doi.org/10.18174/475349>
- Visser, E., Perold, V., Ralston-Paton, S., Cardenal, A. C., & Ryan, P. G. (2019). Assessing the impacts of a utility-scale photovoltaic solar energy facility on birds in the Northern Cape, South Africa. *Renewable Energy*, 133, 1285–1294. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.106>
- Wagegg, J., & Trumpp, S. (2015). Freiflächen-Solaranlagen und Naturschutz – Eingriff oder Verbesserung im Vergleich zur Landwirtschaft. *Natur und Recht*, 37(12), 815–821. <https://doi.org/10.1007/s10357-015-2926-2>
- Walston, L. J., Li, Y., Hartmann, H. M., Macknick, J., Hanson, A., Nootenboom, C., ... Hellmann, J. (2021). Modeling the ecosystem services of native vegetation management practices at solar energy facilities in the Midwestern United States. *Ecosystem Services*, 47, 101227. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101227>
- Walston, L. J., Mishra, S. K., Hartmann, H. M., Hlohowskyj, I., McCall, J., & Macknick, J. (2018). Examining the Potential for Agricultural Benefits from Pollinator Habitat at Solar Facilities in the United

States. *Environmental Science & Technology*, 52(13), 7566–7576.

<https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00020>

- Walston, L. J., Rollins, K. E., LaGory, K. E., Smith, K. P., & Meyers, S. A. (2016). A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. *Renewable Energy*, 92, 405–414. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.02.041>
- Wang, G., Zhai, Y., Zhang, S., Diomedea, L., Bigini, P., Romeo, M., ... Peijnenburg, W. J. G. M. (2020). An across-species comparison of the sensitivity of different organisms to Pb-based perovskites used in solar cells. *Science of The Total Environment*, 708, 135134. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135134>
- Weselek, Alex, Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2019). *Agrophotovoltaik – Auswirkungen auf Mikroklima und landwirtschaftliche Erträge* [Beiträge zur 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau]. <https://orgprints.org/id/eprint/36099/>
- Weselek, Axel, Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., & Högy, P. (2021). Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development*, 41(5), 1–15.
- Weselek, Axel, Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., & Högy, P. (2019). Agrophotovoltaic systems: Applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 39(4), 35. <https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3>
- Widmer, I., Mühlethaler, R., Baur, B., Gonseth, Y., Guntern, J., Klaus, G., ... Altermatt, F. (2021). *Insektenvielfalt in der Schweiz: Bedeutung, Trends, Handlungsoptionen*. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5144739>
- Wilkening, J., & Rautenstrauch, K. (2019). Can Solar Farms Be Wildlife Friendly? *The Wildlife Professional*, 13(1), 5.
- Wilson, B., & van Zyl, I. (2012). *Avifaunal and Chiroptera Specialist Study for the Development of Photovoltaic Power Stations at Welcome Wood, Northern Cape*. Zoology Departement, McGregor Museum.
- Wu, S., Li, Y., Wang, P., Zhong, L., Qiu, L., & Chen, J. (2016). Shifts of microbial community structure in soils of a photovoltaic plant observed using tag-encoded pyrosequencing of 16S rRNA. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 100(8), 3735–3745. <https://doi.org/10.1007/s00253-015-7219-4>

8. Anhang: Voransicht Literaturliste

Die Excel-Literaturliste steht als separates Dokument zur Verfügung und umfasst **180 Einträge aus 137 Publikationen**.

ID	Artikel ID	Publikation							Geografie			Freiflächen-PVA			Fragestellung / Methodik			Hauptkenntnisse			
		Validität	Datentyp	Autor(er) ¹	Titel	doi / URL	Jahr	Journal / Bericht	Journal-Typ	Kontinent	Land	Habitat(typ)(er) ¹	Anlagentyp	Spezifikation	Grösse	Kernfrage(n)	Indikator(en)	Taxon / Taxo	Auswirkungen, v.a. auf Biodiversität / Landwirtschaft	Effektstärke	Präzisierung / Ergänzung
1	1	wissensch. Paper mit Peer Review	Sekundärdaten und Metastudien	Nematchoua MK et al.	Influence of energy mix on the life cycle of an eco-neighborhood, a case study of 150 countries	https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.07.141	2020	Renewable Energy	Energie und Ökologie	interkontinental	>150	-	-	-	Auswirkungen des Energiemixes von 150 Ländern auf Treibhauseffekt, Energiebedarf und mögliche negative Einflüsse auf Biodiversität	multifunktional	-	Bau von PVA in ökologisch hochwertigen Lebensräumen erhöht negativen Impact auf biologische Vielfalt um bis zu 25 %	-	negativer Einfluss auf biologische Vielfalt gemäss Modellrechnungen besonders hoch in Subsahara-Afrika und im Nahen Osten, aber z.B. niedrig in den USA und in der EU	
2	2	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Guiller C et al.	Impacts of solar energy on butterfly communities in mediterranean agro-ecosystems	https://doi.org/10.1002/ep.12626	2017	Environmental Progress & Sustainable Energy	Energie und Ökologie	Europa	Frankreich	ehemalige Tongrube	Utility-Scale Solar Energy (USSE)	6.5 MW	18 ha	USSE als Wanderhindernis für Tagfalter	Fauna	Tagfalter	a) kein isolierender Effekt von USSE auf Aktivität mobiler Tagfalter in der Umgebung b) kein Effekt von USSE auf sesshafte Tagfalter in der Umgebung, da diese ihre Lebensräume kaum verlassen c) Emission von polarisiertem Licht durch PVA verleitet Wasserinsekten zu Eiablage auf Panels d) matte Antireflexionsbeschichtungen (ARB) können bei sachgerechter Anwendung negativen Effekt auf einzelne Wasserinsektengruppen vermindern	kein/gering	Aufnahmetransekte im Umfeld der USSE-Anlagen, keine Bewilligung für Tagfalteraufnahmen innerhalb der Anlage selbst erhalten (!)
3	3	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Száz D et al.	Polarized light pollution of matte solar panels: anti-reflective photovoltaics reduce polarized light pollution but benefit only some aquatic insects	https://doi.org/10.1007/s10941-016-9897-3	2016	Journal of Insect Conservation	Zoologie	Europa	Ungarn	-	PV-Anlage (PVA)	Paneln mit verschiedenen Beschichtungen	-	Effekt von PV-Beschichtungen auf Eiablageverhalten von Wasserinsekten	Fauna	Eintagsfliegen, Bremsen, Zuckmücken	matte Antireflexionsbeschichtungen (ARB) können bei sachgerechter Anwendung negativen Effekt auf einzelne Wasserinsektengruppen vermindern	mittel	eher indifferent und bei Eintagsfliegen sogar negativ; bei bedecktem Himmel vermehrte Eiablagen auf Panels, z.B. durch Eintagsfliegen. Autoren empfehlen generell auf PVA in Gewässernähe zu verzichten
4	4	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Horváth G et al.	Reducing the Maladaptive Attractiveness of Solar Panels to Polarotactic Insects	https://doi.org/10.1111/1523-1739.2010.01518.x	2010	Conservation Biology	Ökologie allgemein	Europa	Ungarn	-	PV-Anlage (PVA)	nicht beschichtete Panels	-	Effekt auf Eiablageverhalten von Wasserinsekten	Fauna	Eintagsfliegen, Steinfliegen, Langbeinfliegen und Bremsen	a) PV-Panels können horizontal polarisiertes Licht so stark reflektieren, dass sie für Wasserinsekten wie Wasserflächen erscheinen und sie zur Eiablage auf den Panels verleiten > "ökologische Fallen" b) PV-Panels mit weissen Rändern waren 10 bis 26 mal weniger attraktiv für Wasserinsekten als Panels ohne weisse Trennwände	stark	bei bestimmten Einfallswinkeln reflektieren Panels Licht fast vollständig (Polarisationsgrad d = 100 %) und übertreffen typische Polarisationswerte für Wasser (d = 30-70 %) deutlich
5	5	Projektbericht/Buch/Internetartikel	Sekundärdaten und Metastudien	Dickrell J	Solar Panels Double as Summer Cow Shades	https://www.dairybusiness.com/14-cow-panels-double-as-summer-cow-shades/	2018	Dairy Business	Landwirtschaft	Nordamerika	USA	Wiese	PV-Anlage (PVA)	2.5-3 m oberhalb Boden	-	Nutzung des Schattenwurfs	Landwirtschaft	Milchkühe, Kälber	Milchkühe und Kälber nutzen Schatten unter PV-Panels (30-40 Tiere pro System; Systemgröße im Text jedoch nicht präzisiert)	stark	Folgeuntersuchungen durch University of Minnesota vorgesehen
6	6	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Adeh Hassanpour E et al.	Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency	https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256	2018	Plos One	Diverses	Nordamerika	USA	unbewässerte Schafweide mit Wasserstress	PV-Anlage (PVA)	Neigungswinkel 18 Grad (südexponiert); Leistung 1485 kW	ca. 2.5 ha	mikroklimatische Effekte auf Boden unter PV-Panels	Mikroklima/Boden/Wasser	-	a) Bereiche unter PV-Panels mit höherer Bodenfeuchte b) starker Anstieg der Biomasse um 90 % in der Spätsaison c) signifikant wassersparender (328 % effizienter)	stark	-
7	7	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Pereszalényi A et al.	Atypical feeding of woodpeckers, crows and redstarts on mass-swarming Hydropsyche pellucidula caddisflies attracted to glass panes	https://doi.org/10.1007/s11252-017-0672-3	2017	Urban Ecosystems	Ökologie allgemein	Europa	Ungarn	Glasbauten an Flussufer	andere	Glasfassaden in Wassernähe auf polarotaktische Wasserinsekten und ihre Fressfeinde (indirekte Evidenz)	-	Attraktion von Glasfassaden in Wassernähe auf polarotaktische Wasserinsekten und ihre Fressfeinde	Fauna	Köcherfliegen, Vögel	schwärmende Köcherfliegen um Glasfassaden in Ufernähe als Nahrungsgrundlage, u.a. für Spechte, Nebelkrähen, Elstern und verschiedene Singvögel	stark	indirekter Bezug zu PV-Panels, die eine vergleichbare Wirkung auf polarotaktische Wasserinsekten aufweisen
8	8	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Schindler B et al.	Green roof and photovoltaic panel integration: Effects on plant and arthropod diversity and electricity production	https://doi.org/10.1016/j.landurb.2019.06.008	2018	Journal of Environmental Management	Ökologie allgemein	Asien	Israel	unbewässerte Dächer	PV-Anlage (PVA)	30 cm oberhalb Substratlager; 20 Grad-Winkel	1 Panel: 1 m * 2 m	Vergleich Wirbellosefauna auf begrüntem Dächern mit und ohne PV-Panels sowie auf unbegrüntem Dächern mit PV-Panels	Fauna	Wirbellose	a) kein Effekt auf Pflanzenarten-Vielfalt insgesamt b) verlängerte Blühzeit bei einjährigen Pflanzen und stärkeres Wachstum von Sedum (Mauerpflanze) auf Dächern mit PV-Panels c) größere Heterogenität der Substratfeuchte bei Vorhandensein von PV-Panels, jedoch keine höhere durchschnittliche Substratfeuchte d) Cooling-Effekt nur direkt unterhalb den PV-Panels	kein/gering	Bemerkung: PVA auf Dächern sind nicht Teil unserer Literaturstudie. Diese Publikation wird erwähnt, weil sie evtl. Rückschlüsse auf Freiflächen-PVA liefern könnte.
9	8	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Schindler B et al.	Green roof and photovoltaic panel integration: Effects on plant and arthropod diversity and electricity production	https://doi.org/10.1016/j.landurb.2019.06.008	2018	Journal of Environmental Management	Ökologie allgemein	Asien	Israel	unbewässerte Dächer	PV-Anlage (PVA)	30 cm oberhalb Substratlager; 20 Grad-Winkel	1 Panel: 1 m * 2 m	Vergleich Vegetation von begrüntem Dächern mit und ohne PV-Panels	Vegetation	-	a) kein Effekt auf Pflanzenarten-Vielfalt insgesamt b) verlängerte Blühzeit bei einjährigen Pflanzen und stärkeres Wachstum von Sedum (Mauerpflanze) auf Dächern mit PV-Panels c) größere Heterogenität der Substratfeuchte bei Vorhandensein von PV-Panels, jedoch keine höhere durchschnittliche Substratfeuchte d) Cooling-Effekt nur direkt unterhalb den PV-Panels	kein/gering	Bemerkung: PVA auf Dächern sind nicht Teil unserer Literaturstudie. Diese Publikation wird erwähnt, weil sie evtl. Rückschlüsse auf Freiflächen-PVA liefern könnte.
10	8	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Schindler B et al.	Green roof and photovoltaic panel integration: Effects on plant and arthropod diversity and electricity production	https://doi.org/10.1016/j.landurb.2019.06.008	2018	Journal of Environmental Management	Ökologie allgemein	Asien	Israel	unbewässerte Dächer	PV-Anlage (PVA)	30 cm oberhalb Substratlager; 20 Grad-Winkel	1 Panel: 1 m * 2 m	Vergleich Mikroklima von begrüntem Dächern mit und ohne PV-Panels	Mikroklima/Boden/Wasser	-	a) kein Effekt auf Pflanzenarten-Vielfalt insgesamt b) verlängerte Blühzeit bei einjährigen Pflanzen und stärkeres Wachstum von Sedum (Mauerpflanze) auf Dächern mit PV-Panels c) größere Heterogenität der Substratfeuchte bei Vorhandensein von PV-Panels, jedoch keine höhere durchschnittliche Substratfeuchte d) Cooling-Effekt nur direkt unterhalb den PV-Panels	mittel	Bemerkung: PVA auf Dächern sind nicht Teil unserer Literaturstudie. Diese Publikation wird erwähnt, weil sie evtl. Rückschlüsse auf Freiflächen-PVA liefern könnte.
11	9	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Tanner K et al.	Extremophilic microbial communities on photovoltaic panel surfaces: a two-year study	https://doi.org/10.1111/1751-7915.13620	2020	Microbial Biotechnology	Diverses	Europa	Spanien	unbegrüntes Flachdach	PV-Anlage (PVA)	kombiniert in einem Aluminiumrahmen	1 Kleinspanel: 19 * 27 cm	mikrobielle Fauna auf PV-Panels	Mikroorganismen	mikrobielle Bakterien und Pilze	a) Artenreichtum und Dichte von Vögeln innerhalb USSE-Anlage tendenziell kleiner als in Randzone und im angrenzenden, nicht umgestalteten Land b) anscheinend keine bedrohten Arten beeinträchtigt, aber weitere Daten erforderlich	mittel	Bemerkung: PVA auf Dächern sind nicht Teil unserer Literaturstudie. Diese Publikation wird erwähnt, weil sie evtl. Rückschlüsse auf Freiflächen-PVA liefern könnte.
12	10	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Visser E et al.	Assessing the impacts of a utility-scale photovoltaic solar energy facility on birds in the Northern Cape, South Africa	https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.106	2019	Renewable Energy	Energie und Ökologie	Afrika	Südafrika	offene Savanne	Utility-Scale Solar Energy (USSE)	eine der größten Anlagen Südafrikas (96 MW)	180 ha	Effekt von USSE-Anlagen auf Vögel	Fauna	Vögel	a) Salatertrag gleich oder höher als bei der geringeren Sonneneinstrahlung zu erwarten wäre b) Salatertrag wird durch verbesserte Radiation Interception Efficiency (RIE) im Schatten aufrechterhalten (Salat bildet im Schatten grössere Blätter)	mittel	-
13	11	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Maia AS et al.	Photovoltaic panels as shading resources for livestock	https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120551	2020	Journal of Cleaner Production	Energie und Ökologie	Südamerika	Brasilien	Wiese	Agrophotovoltaik (APV)	20 kombinierte PV-Panels; 3 m oberhalb Boden; 15 Grad-Winkel	4 m * 5 m	Attraktivität von PV-Panels als Schattenspender	Fauna	Nutztiere (Schafe und Lämmer)	Schafe und Lämmer verbrachten weniger als 1 % ihrer Zeit unter dem Schatten von Textiltüchern, verglichen mit 38 % unter dem Schatten von PV-Panels	mittel	geringere Wärmestrahlung unter PV-Panels als unter Textiltüchern (ca. minus 40 W pro m2)
14	12	Projektbericht/Buch/Internetartikel	empirische Primärdaten	Weselek A et al.	Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau «Agrophotovoltaik – Auswirkungen auf Mikroklima und landwirtschaftliche Erträge»	https://ojsprints.org/doi/epint/360/99/	2019	Beiträge zur 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Kassel, 5. bis 8. März 2019	Landwirtschaft	Europa	Deutschland	Ackerfläche	Agrophotovoltaik (APV)	PV-Panels 6 m oberhalb Boden über Winterweizen und Kleegras (30 % Deckung durch Panels)	0.3 ha	Ertragsveränderungen bei Ackerkulturen	Landwirtschaft	-	a) Kleegras: leichte Ertragsreduktion der Gesamtrockenmasse um 5.3 % b) ausgeprägter Rückgang beim Winterweizen um 18.7 %	mittel	nur einjähriger Versuch, mehrjährige Versuchsreihen mit verschiedenen Kulturen werden empfohlen
15	12	Projektbericht/Buch/Internetartikel	empirische Primärdaten	Weselek A et al.	Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau «Agrophotovoltaik – Auswirkungen auf Mikroklima und landwirtschaftliche Erträge»	https://ojsprints.org/doi/epint/360/99/	2019	Beiträge zur 15. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Kassel, 5. bis 8. März 2019	Landwirtschaft	Europa	Deutschland	Ackerfläche	Agrophotovoltaik (APV)	PV-Panels 6 m oberhalb Boden über Winterweizen und Kleegras (30 % Deckung durch Panels)	0.3 ha	Veränderungen bei Bodentemperatur und -wassererhalt sowie bei Lufttemperatur und -feuchtigkeit	Mikroklima/Boden/Wasser	-	a) Bodentemperatur auf Referenzfläche im Weizen- und Kleegrasbestand geringfügig höher (6.1 % bzw. 8.9 %) b) keine Unterschiede bei Lufttemperatur und -feuchtigkeit c) volumetrischer Wassergehalt des Bodens beim Weizen auf PV-Fläche im Vergleich zur Referenzfläche leicht erhöht (4.1 %), hingegen im Kleegras reduziert (-6.4 %)	mittel	nur einjähriger Versuch, mehrjährige Versuchsreihen mit verschiedenen Kulturen werden empfohlen
16	13	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Marrou H et al.	Productivity and radiation use efficiency of lettuce grown in the partial shade of photovoltaic panels	https://doi.org/10.1016/j.eja.2012.08.003	2013	European Journal of Agronomy	Landwirtschaft	Europa	Frankreich	Ackerfläche	Agrophotovoltaik (APV)	PV-Panels 4 m oberhalb Boden über vier verschiedenen Salatorten	-	Auswirkungen von zwei PV-Typen auf den Ernteertrag: Beschattungsintensität 50 % bzw. 70 % der einfallenden Strahlung	Landwirtschaft	-	a) Anbau von Nutzpflanzen unter APV kann zu sinkenden Ernteerträgen führen, da die Sonneneinstrahlung unter den Paneelen um etwa ein Drittel reduziert sein dürfte b) potenzielle Vorteile für Pflanzenproduktion durch zusätzliche Beschattung und beobachtete Verbesserungen der Wasserproduktivität wahrscheinlich (Abfederung Klimawandel)	kein/gering	zweijähriger Versuch
17	14	wissensch. Paper mit Peer Review	Sekundärdaten und Metastudien	Weselek A et al.	Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review	https://doi.org/10.1007/s13593-019-0581-3	2019	Agronomy for Sustainable Development	Landwirtschaft	interkontinental	-	-	Agrophotovoltaik (APV)	-	-	Review zum Stand der Technik; mikroklimatische Veränderungen und Auswirkungen von APV auf die landwirtschaftliche Produktion	Landwirtschaft	-	a) PSC verwenden meist ein Komposit mit Perowskit-Struktur und ein Hybrid aus Pb-basierten Nanomaterialien. Ihr Betrieb kann zur Freisetzung von Pb-basierten Nanopartikeln führen b) Toxizität für höhere Organismen noch offen	mittel	durch kombinierte Energie- und Pflanzenproduktion könnte APV die Produktivität einer Landwirtschaftsfläche um bis zu 70 % steigern
18	15	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Wang G et al.	An across-species comparison of the sensitivity of different organisms to Pb-based perovskites used in solar cells	https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135134	2020	Science of the total Environment	Ökologie allgemein	-	-	-	PV-Anlage (PVA)	Perovskite solar cells (PSC)	-	Mögliche Toxizität organisch-anorganischer Perovskit-Solarzellen auf Mikroorganismen; Evaluation möglicher Indikator-Mikroorganismen	Mikroorganismen	Bakterien	a) bei allen getesteten Spezies vergleichbare Toxizitäten b) Vibrio fischeri am geeignetsten, da die Art im Vergleich zu den anderen getesteten Organismen eine höhere Sensitivität, geringe Kosten und einen relativ hohen Durchsatz aufweist	mittel	a) PSC verwenden meist ein Komposit mit Perowskit-Struktur und ein Hybrid aus Pb-basierten Nanomaterialien. Ihr Betrieb kann zur Freisetzung von Pb-basierten Nanopartikeln führen b) Toxizität für höhere Organismen noch offen
19	16	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Horváth G et al.	Horsefly reactions to black surfaces: attractiveness to male and female tabanids versus surface tilt angle and temperature	https://doi.org/10.1007/s00436-020-06702-7	2020	Parasitology Research	Zoologie	Europa	Ungarn	Grünland auf Pferdefarm	PV-Anlage (PVA)	neun auf der einen Seite schwarz gestrichene und auf der anderen Seite unbehandelte Holzplatten	1 Platte: 50 cm * 50 cm	Effekt von schwarz glänzenden Oberflächen auf Bremsen (Diptera: Tabanidae) in Abhängigkeit des Lichteinfallswinkels	Fauna	Bremsen (Tabanidae)	a) Gesamtzahl der männlichen und weiblichen Tabaniden am höchsten bei horizontaler Oberfläche (δ = 0 Grad), am tiefsten bei δ = 75 Grad b) Verweildauer der Bremsen auf der schwarz glänzenden horizontalen Oberfläche nimmt mit steigenden Temperaturen ab, bei > 58 °C nicht länger als 1 s	stark	PV-Panels können horizontal polarisiertes Licht induzieren ("polarisierte Lichtverschmutzung") und Temperaturen von über 55 °C erreichen
20	17	wissensch. Paper mit Peer Review	empirische Primärdaten	Motta CM et al.	Potential toxicity of improperly discarded exhausted photovoltaic cells	https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.048	2016	Environmental Pollution	Diverses	Europa	Italien	-	PV-Anlage (PVA)	21-jähriges PV-Panel, max. 220 W, monokristallin	99 cm * 165 cm, mechanisch in Kleinstücke zerlegt	Toxizität von Low-Tech-PV-Panels und ordnungsgemäße Entsorgung	Fauna	zwei marine Kleinkrebs-Arten und eine Seeigel-Art	a) Freisetzung geringer Mengen an Elektrolyten (Na, Ca und Mg), mit einer Konzentration unterhalb des akzeptierten maximalen Schadstoffgehalts b) Nickel-Freisetzung in einer potenziell toxischen Konzentration c) Entwicklungsdefekte und z.T. höhere Mortalität bei tierischen Testorganismen	stark	höhere Mortalität beim Kleinkrebs Daphnia magna; Entwicklungsstörungen beim Salmekrebs Artemia salina und beim Seeigel Paracentrotus lividus