

Biodiversitätsentwicklung in Freiflächen-Photovoltaikanlagen – Einflussfaktoren und Wechselwirkungen nutzbar machen?

Biodiversity development in ground mounted photovoltaic systems – harnessing influencing factors and interactions?

Julia Lüdemann

Zusammenfassung

Es gibt zahlreiche Leitfäden und Vorschriften, um den Ausbau an Freiflächen-Photovoltaik naturfreundlich zu gestalten. Diese setzen Wirkzusammenhänge zwischen PV-Anlagen und der lokalen Biodiversitätsentwicklung voraus. Es fehlt allerdings an empirischen Daten, um die tatsächlichen Effekte zu belegen. Im vorliegenden Framework werden die in der Literatur gefundenen Einflussfaktoren (Umgebung, Vornutzung, Bauprozess, technische Ausgestaltung, Management) sowie deren Effekte und Wechselwirkungen in räumliche und zeitliche Dimensionen geordnet. Diese können auf Basis weitergehender Untersuchungen für eine gezielte Steuerung der Biodiversitätsentwicklung (z. B. für Artenschutz) eingesetzt werden.

Solarenergie, Energiewende, Naturschutz, Artenvielfalt, Landnutzungskonflikte

Abstract

There are numerous guidelines and regulations to make the expansion of ground-mounted photovoltaics nature-friendly. These presuppose interdependencies between PV systems and local biodiversity development. However, there is a lack of empirical data to prove the actual effects. In this framework, the influencing factors found in the literature (surroundings, previous use, construction process, technical design, management) and their effects and interactions are organized in spatial and temporal dimensions. Based on further studies, these can be used for the targeted management of biodiversity development (e.g. for species protection).

Solar energy, energy transition, nature conservation, species richness, land use conflicts

doi: 10.23766/NiPF.202501.08

Warum müssen Biodiversitätseffekte von Freiflächen-Photovoltaikanlagen untersucht werden?

Um die deutschen Klimaziele und insbesondere die Energiewende bis 2045 zu erreichen, wurde in den letzten Jahren vermehrt auf eine Beschleunigung im Ausbau erneuerbarer Energien gesetzt. Im Zuge dessen diskutieren Wissenschaft, Praxis und Politik immer wieder über die Wirkungen verschiedener Technologien auf Natur und Umwelt. Beispielsweise ist für die Solarenergieerzeugung ein Ausbau von 99,3 Gigawatt (GW) am Jahresende 2024 auf 215 GW bis 2030 geplant, welcher etwa zur Hälfte in Form von Freiflächen-Photovoltaikanlagen (FF-PV) erfolgen soll (Bundesnetzagentur, 2025). Die Potenziale für eine naturfreundliche Gestaltung von FF-PV-Anlagen, oder sogar eine Mehrfachnutzung der Fläche, z. B. für den naturschutzfachlichen Ausgleich, werden immer wieder hervorgehoben (z. B. Dubina et al., 2022; Feldmeier et al., 2024), sind bisher jedoch nur teilweise mit empirischen Daten belegt. Herausforderungen sind hierbei die geringe Anzahl an quantitativen Untersuchungen sowie die Vergleichbarkeit der vorhandenen Ergebnisse. Viele Felduntersuchungen sind nur in wenigen Anlagen oder in kurzen Zeiträumen erfolgt und nutzen unterschiedliche Methoden und Bewertungsebenen (Schlegel, 2021). Trotzdem gibt es zahlreiche Leitfäden für die naturfreund-

liche Gestaltung von FF-PV-Anlagen, in denen Zusammenhänge zwischen den Anlagen und der lokalen Biodiversitätsentwicklung vorausgesetzt werden (z. B. BSW & NABU, 2021; KNE, 2024).

Auch von Seiten des Gesetzgebers gibt es Vorgaben, um negative Auswirkungen auf Natur und Umwelt zu vermeiden. So ist laut Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) § 37 der Bau von FF-PV-Anlagen in Schutzgebieten nach BNatSchG sowie in FFH und Natura-2000 Gebieten nicht möglich. Der Ausbau soll stattdessen vorrangig auf benachteiligten oder vorbelasteten Flächen erfolgen, z. B. auf Konversionsflächen und entlang von Verkehrswegen. Um zusätzlich einen naturfreundlichen, biodiversitätsfördernden Ausbau voranzutreiben, wurden 2024 durch das „Solarpaket I“ fünf Naturschutzkriterien festgelegt. Davon müssen mindestens drei bei der Planung neuer Anlagen berücksichtigt und durch den Netzbetreiber kontrolliert werden (BMWK, 2024):

- Maximal 60 % der Gesamtfläche ist von PV-Modulen überdeckt
- „Biodiversitätsförderndes Pflegekonzept“ mit entweder an den Flächenertrag angepasster Beweidung oder zweischüriger Mahd mit Entnahme des Mahdgutes
- Maximal 60 % der Gesamtfläche ist von PV-Modulen überdeckt



- „Biodiversitätsförderndes Pflegekonzept“ mit entweder an den Flächenertrag angepasster Beweidung oder zweischüriger Mahd mit Entnahme des Mahdgutes
- Durchgängigkeit für Kleintiere bei der Umzäunung (15 cm Boden-Abstand) und ab 500 m Zaunlänge Wanderkorridore für große Säugetiere
- Biotopelemente auf mindestens 10 % der Fläche, z. B. heimische Gehölze/Hecken, regionales Saatgut, Kleingewässer
- Bodenschonender Betrieb durch Verzicht auf Pflanzenschutz- oder Düngemittel und umweltschädliche Reinigungsmittel

Inwieweit die Umsetzung der Empfehlungen aus den Leitfäden oder der benannten Naturschutzkriterien tatsächlich zu einer Förderung der Biodiversität beiträgt, kann aufgrund der oben beschriebenen Datenlücke zu diesem Zeitpunkt noch nicht gesagt werden. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es daher, zu verstehen, inwiefern sich die verschiedenen Parameter einer Freiflächen-Photovoltaikanlage auf die lokale Biodiversitätsentwicklung auswirken, welche Wechselwirkungen es gibt und wie diese möglicherweise nutzbar gemacht werden können. Hierzu wird ein Framework zum Überblick über die beschriebenen Wirkzusammenhänge entwickelt. Dieses soll im Rahmen der Dissertation der Autorin als Grundlage für weiterführende Literaturuntersuchungen und die Entwicklung eines standardisierten Monitoring-Konzeptes für FF-PV-Anlagen dienen.

Wie wurde das Framework erstellt und welche Parameter wurden einbezogen?

Zunächst wurde ein Überblick über die verfügbare Literatur zu Auswirkungen von FF-PV-Anlagen auf die lokale Biodiversität gewonnen und die oben erwähnten Herausforderungen (v. a. Mangel an quantitativen Daten) sowie die nachfolgend beschriebenen Zusammenhänge und Effekte identifiziert. Durch eine Einordnung in räumliche und zeitliche Dimensionen wurden die Effekte, Variablen und Wechselwirkungen anschließend in Form des Frameworks aufbereitet. Die einzelnen Elemente wurden größtenteils aus Leitfäden und anderer grauer Literatur entnommen und durch qualitative Ergebnisse aus wissenschaftlichen Artikeln und Literatur-Reviews verfeinert.

Um den Untersuchungsgegenstand abzugrenzen, wurde der Fokus zunächst ausschließlich auf FF-PV-Anlagen über Grünland gelegt. Auch wenn ähnliche Effekte beispielsweise bei Anlagen auf Deponien, Gewässern oder ackerbaulich genutzten Flächen wiederzufinden sind, würde die Darstellung der zusätzlichen technischen und ökologischen Faktoren das Framework zu unübersichtlich machen.

Bei der Betrachtung der Biodiversität wird vornehmlich die Entwicklung der Flora und Fauna auf der Fläche der Anlage in den Fokus genommen, also die Vielfalt an Arten und ihre Verteilung (Härdtle, 2024). Die Wirkung auf Mikroorganismen und die Vielfalt an Ökosystemen werden eher als Zwischenschritte mitbe-

dacht. Die genetische und die funktionale Diversität werden in der Diskussion aufgegriffen. In der räumlichen Dimension beinhaltet die PV-Anlage die gesamte Fläche, die eigentumsrechtlich zur Anlage gehört und meist baulich abgegrenzt ist (Feldmeier et al., 2024). Dies umfasst alle technischen Anlagen und ggf. ausgesparte Flächen innerhalb der Umzäunung. Die Umgebung definiert sich durch ihren potenziellen Einfluss auf die Biodiversitätsentwicklung in der Anlage und umfasst daher direkt angrenzende Flächen, aber auch Biotope, welche sich z. B. im Radius für Pollenflug, Wasseraustausch oder Jagd/Nahrungssuche verschiedener Tierarten befinden (Blaydes et al., 2022; Uldrijan et al., 2021).

Die zeitliche Dimension umfasst die Standortwahl und Planung der Anlage, den Bauprozess und die Betriebszeit. Innerhalb dieser Phasen können verschiedene Einflüsse durch die Ausgestaltung und den Betrieb der PV-Anlage auf ihre Umwelt und damit die Biodiversitätsentwicklung wirken. Einige Einflussfaktoren treten nur einmalig bzw. über einen kurzen Zeitraum auf (z. B. Boden aufbrechen für den Bau). Die anderen Faktoren können über die gesamte Nutzungsdauer der Anlage wirken, dabei aber entweder über die Zeit gleichbleibend (z. B. bauliche Ausgestaltung) oder schwankend (z. B. Management) bzw. stärker oder schwächer werdend (z. B. Umgebung) sein (Hernandez et al., 2014).

Was nach Ablauf der vorgesehenen Betriebszeit mit der Photovoltaikanlage samt etablierter Diversität geschieht (z. B. „Repowering“ oder Rückbau), hängt wiederum von einem weiterführenden Set an sozio-ökonomischen Faktoren ab. Daher wurden die End-of-life-Szenarien für das vorliegende Framework vorerst ausgeklammert. Gleiches gilt für eine Einordnung der Effekte als positiv oder negativ. Eine solche Wertung hängt von der jeweiligen Zielfrage ab und kann meist nur standortspezifisch getroffen werden. Beispielsweise könnte eine höhere Artenvielfalt als Beitrag gegen den Diversitätsverlust positiv angesehen werden, ist aber ggf. weniger „wert“ als der Erhalt dessen, was vorher auf der Fläche war, bzw. die gezielte Förderung einer bedrohten Art oder gewünschten Ökosystemdienstleistung.

Wie stellen sich die Einflussfaktoren, Variablen und Wirkzusammenhänge für die Biodiversitätsentwicklung in Freiflächen-Photovoltaikanlagen im Framework dar?

Das vorliegende Framework stellt die gefundenen Einflussfaktoren, Variablen und Wirkzusammenhänge ausgehend von einer FF-PV-Anlage auf die Entwicklung von Flora und Fauna innerhalb der Fläche dar. Im Folgenden werden einige Beispiele dieser Effekte und Zusammenhänge näher beschrieben. Die Zahlen und Buchstaben in eckigen Klammern beziehen sich jeweils auf einen Pfeil aus der Abbildung 1.

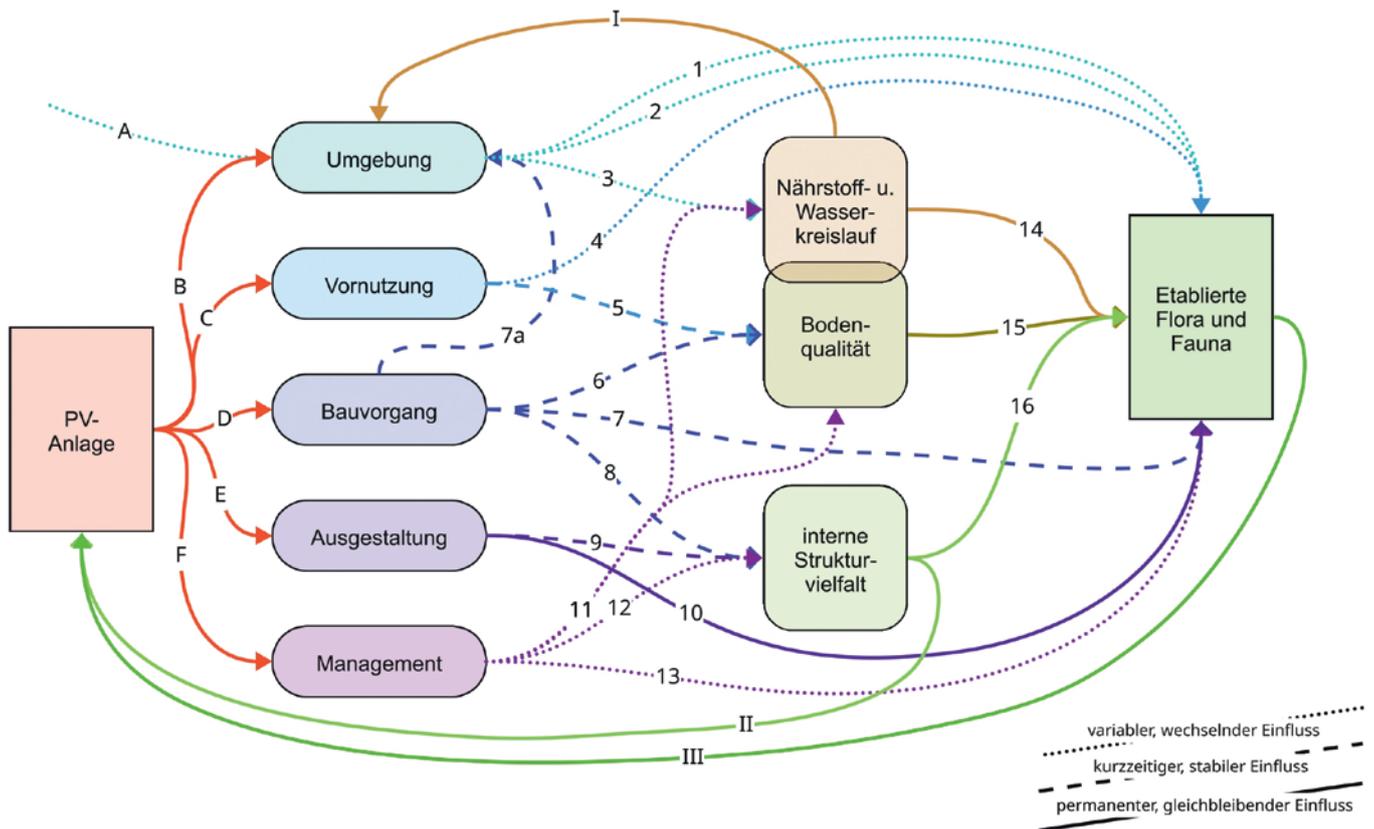


Abbildung 1: Framework – Wirkzusammenhänge für die Biodiversitätsentwicklung in Freiflächen-Photovoltaikanlagen.
Grafik: J. Lüdemann

Aus der Literatur ergeben sich fünf Einflussfaktoren, die teilweise direkt diskutiert oder in Zusammenhang mit anderen Wirkungen genannt werden (z. B. Dubina et al., 2022; Günnewig et al., 2007):

- die Umgebung und darin eingebunden die Standortwahl,
- die Vornutzung der Fläche bzw. der Ausgangszustand der Biodiversität vor Ort,
- der Bauprozess und die damit verbundenen Eingriffe,
- der physische Aufbau der PV-Anlage und ggf. zusätzliche bauliche Maßnahmen
- das Management bzw. die Pflege der Anlagenfläche.

Der Einfluss der Umgebung ist vor allem in der ersten Vegetationsperiode nach Bau der PV-Anlage bemerkbar, da die Wiederbesiedelung der Fläche (ohne Saatgutausbringung) durch natürliche Sukzession, also z. B. auch Sameneintrag aus der Umgebung [1], geschieht (Raab, 2015). Außerdem kann die umgebende Fauna die Fläche der PV-Anlage mitnutzen oder es können sich Tiere in der Anlage ansiedeln, welche auch die umgebenden Biotope nutzen [2] (Lieder & Lumpe, 2011). Es besteht also eine variierende Wechselwirkung über die gesamte Laufzeit.

Die Vornutzung bestimmt maßgeblich den bio-geo-chemischen Ausgangszustand der Anlagenfläche, also welche Pflanzen sich aus Samenbanken wieder ansiedeln können [4] (Lambert et al.,

2022) und wie die Bodenqualität zu Beginn ist [5]. Durch eine gezielte Flächenauswahl [C] kann somit eine potenzielle Aufwertung vorbelasteter Flächen und ein Zuwachs an Biodiversität erfolgen (Thiele, 2024).

Als besonders disruptiver Faktor kann der Bauprozess selbst gesehen werden. Die vorhandene Flora und Fauna (auch in der Umgebung [7a]) werden durch das Aufbrechen des Bodens [6] (Lambert et al., 2022) und den Lärm bzw. die Menschliche Aktivität [7] (Feldmeier et al., 2024) erheblich gestört. Dadurch wird erst die Grundlage für eine neue Entwicklung der Artenzusammensetzung geschaffen. Durch gezielte Aussparung von strukturgebenden Biotopen [8], das Umsiedeln von Tierarten und das Einhalten von Ruhezeiten [D] können hier besonders negative Wirkungen vermieden und positive Effekte gefördert werden (Dubina et al., 2022; KNE 2024).

Die technische und physische Ausgestaltung der PV-Anlage wird ebenfalls durch die Planung [E] bestimmt und bleibt über die gesamte Lebenszeit beständig. Durch Parameter wie z. B. Modulhöhe, Reihenabstände und Zaungestaltung kann beeinflusst werden, welche und wie viele Mikroklimata und Habitate entstehen [9], wie die Lichtverfügbarkeit für Pflanzenwachstum ist und wie sich die Zugänglichkeit/Störwirkung für verschiedene Tierarten gestaltet [10] (KNE, 2024; Peschel, 2010). Außerdem kann die Biodiversität durch das Ausbringen regionaler Blümmischungen und den Aufbau zusätzlicher Strukturelemente/Biotope gefördert werden (BSW & NABU, 2021).



Ebenfalls über die gesamte Lebenszeit der PV-Anlage, aber entsprechend des Managementplans [F] in wechselnder Intensität, ist der Einfluss der Anlagenpflege auf die Biodiversität. Je nach Zielsetzung können z. B. durch Mahd oder Beweidung die Etablierung bestimmter Artengruppen gefördert werden [13] (Dubina et al., 2022) und gleichzeitig ein zusätzlicher Ertrag erzielt werden (Demuth et al., 2019). Außerdem sollte auf den Einsatz von Agrochemikalien und umweltschädlichen Reinigungsmitteln verzichtet [11] und die Pflege gewünschter Strukturelemente einbezogen werden [12] (Peschel, 2010).

Neben den fünf Haupteinflussfaktoren werden im Framework drei Übergangsvariablen dargestellt, in denen sich einige der Effekte bündeln und, die sich wiederum auf die Biodiversitätsentwicklung auswirken oder auf die Anlage zurückwirken. Dazu gehören die Nährstoff- und Wasserkreisläufe, die mit den umgebenden Flächen in Verbindung stehen [3, I], und gemeinsam mit der Bodenqualität (je nach Bearbeitung und Wertzusammensetzung) die Etablierung einer angepassten Pflanzensammensetzung auf der Fläche bestimmen [14, 15] (Demuth et al., 2019; Lambert et al., 2021; Meyer et al., 2023). Die interne Strukturvielfalt wird ebenfalls durch mehrere Einflussfaktoren bedingt. Sie wirkt sich durch die Zusammensetzung an verfügbaren Nischen auf die Biodiversitätsentwicklung aus [16] (Lambert et al., 2021) und kann außerdem zur Aufwertung der optischen Einpassung in die Landschaft [III] und damit einer verbesserten Akzeptanz beitragen (Schlegel 2021).

Als Output ist im Framework die neu etablierte Zusammensetzung von Flora und Fauna dargestellt, welche sich durch die zuvor erklärten Einflüsse über die Lebensdauer der PV-Anlage weiter verändern kann. Als Momentaufnahme hat diese entstandene Biodiversität aber ebenfalls eine Rückwirkung auf die PV-Anlage [III] (Schlegel, 2021), da sie je nach Artenzusammensetzung verschiedene Ökosystemdienstleistungen wie z. B. Bestäubung (Meyer et al., 2023) erbringen und zur Akzeptanz der Anlage beitragen kann (Peschel, 2010).

Wie können die Effekte und Wechselwirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf die lokale Biodiversitätsentwicklung nutzbar gemacht werden?

Das Framework zeigt, dass in und durch FF-PV-Anlagen auf verschiedenen räumlichen und zeitlichen Ebenen Einflüsse auf die Entwicklung der lokalen Biodiversität bestehen. Diese Einflussfaktoren stehen teilweise miteinander in Wechselwirkung und wirken auch auf die PV-Anlage zurück. Das in der Literatur beschriebene Potenzial für naturfreundliche oder sogar Biodiversität fördernde Anlagen, ebenso wie die potenziellen negativen Einflüsse, hängen maßgeblich von der Planung und dem Betrieb der PV-Anlage und damit den hier identifizierten Wirkzusammenhängen ab. Solange nur wenig quantitative Belege für die tatsächlichen Effekte vorliegen, müssen diese Zusammenhänge weitgehend standortspezifisch untersucht und umgesetzt werden, um sie für

eine gezielte Wirkung nutzbar machen zu können. Um also eine hohe Diversität oder ein bestimmtes Ziel (z. B. Schutz bedrohter Arten) zu erreichen, sollten die vorgelagerten Einflussfaktoren bereits in der Planung der FF-PV-Anlage bedacht und entsprechend gesteuert werden. Dies setzt voraus, dass die beschriebenen Wirkzusammenhänge noch weiter beforscht und bestenfalls mit quantitativen Daten aus standardisierten Felduntersuchungen/Monitorings belegt werden. Für die Zukunft wäre eine weitergehende politische Unterstützung für den biodiversitätsfördernden Ausbau der Photovoltaik wünschenswert, damit der entstehende Mehraufwand gedeckt oder sogar eine Vergütung der Zusatzleistung für Natur und Gesellschaft möglich wird.

Danksagung

Ich danke allen Menschen, die mich auf meiner Promotionsreise begleiten und unterstützen.

Die vorliegenden Forschungsarbeiten sind Teil der vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützten sozial-ökologischen Nachwuchsforschungsgruppe „SteuerBoard Energie“.

Quellenverzeichnis

- BLAYDES, H., GARDNER, E., WHYATT, J. D., POTTS, S. G., & ARMSTRONG, A. (2022). Solar park management and design to boost bumble bee populations. *Environmental Research Letters*, 17(4).
- BMWK, (BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND KLIMASCHUTZ). (2024). Naturschutzfachliche Mindestkriterien bei PV-Freiflächenanlagen.
- BSW, (BUNDESVERBAND SOLARWIRTSCHAFT E.V.), & NABU, (NATURSCHUTZBUND DEUTSCHLAND E. V.). (2021). Kriterien für naturverträgliche Photovoltaik-Freiflächenanlagen—Gemeinsames Papier, Stand April 2021.
- BUNDESNETZAGENTUR. (2025). Ausbau Erneuerbarer Energien 2024. https://www.bundesnetzagentur.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/DE/2025/20250108_EE.html
- DEMUTH, B., MAACK, A., & SCHUMACHER, J. (2019). Photovoltaik-Freiflächenanlage: Planung und Installation mit Mehrwert für den Naturschutz (Heft 6; S. 30). Bundesamt für Naturschutz.
- DUBINA, L., BONADIO, J., CHEVILLARD, N., ROSSI, R., DI BLASI, M., DUBOIS, A., KRIJGVELD, K., ROSENBERG, W., TAGLIAPIETRA, M., TRIP, S., VANDEST, E., & WANCKEL, M. (2022). Solar, Biodiversity, Land Use: Best Practice Guidelines. SolarPower Europe.
- FELDMEIER, DR. S., FOLZ, S., KONRAD, J., MÜLLER, D., & SEIBERT, M. (2024). Möglichkeiten und Grenzen des artenschutzrechtlichen Ausgleichs in Solarparks. KNE.
- GÜNNEWIG, D., SIEBEN, A., PÜSCHEL, M., BOHL, J., & MACK, M. (2007). Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen (S. 126). Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.
- HÄRDTLE, W. (2024). Was ist Biodiversität? In W. Härdtle (Hrsg.), *Biodiversität, Ökosystemfunktionen und Naturschutz* (S. 1–26). Springer.
- HERNANDEZ, R. R., EASTER, S. B., MURPHY-MARISCAL, M. L., MAESTRE, F. T., TAVASSOLI, M., ALLEN, E. B., BARROWS, C. W., BELNAP, J., OCHOA-HUESO, R., RAVI, S., & ALLEN, M. F. (2014). Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 29.
- KNE, (KOMPETENZZENTRUM NATURSCHUTZ UND ENERGIEWENDE). (2024). Naturverträgliche Gestaltung von Solarparks - Maßnahmen und Hinweise zur Gestaltung. https://www.naturschutz-energieewende.de/wp-content/uploads/KNE_Kriterienkatalog-zur-naturvertraeglichen-Anlagengestaltung-PV-Freiflaechenanlagen.pdf
- LAMBERT, Q., BISCHOFF, A., CUEFF, S., CLUCHIER, A., & GROS, R. (2021). Effects of solar park construction and solar panels on soil quality, microclimate, CO₂ effluxes, and vegetation under a Mediterranean climate. *Land Degradation & Development*, 32(18).
- LAMBERT, Q., GROS, R., & BISCHOFF, A. (2022). Ecological restoration of solar park plant communities and the effect of solar panels. *Ecological Engineering*, 182.
- LIEDER, K., & LUMPE, J. (2011). Vögel im Solarpark – eine Chance für den Artenschutz? Auswertung einer Untersuchung im Solarpark Ronneburg „Süd I“ (S. 11 S.). <http://archiv.windenergetage.de/20F3261415.pdf>
- MEYER, M. H., DULLAU, S., SCHOLZ, P., MEYER, M. A., & TISCHEW, S. (2023). Bee-Friendly Native Seed Mixtures for the Greening of Solar Parks. *Land*, 12(6).
- PESCHEL, T. (2010). Solarparks – Chancen für die Biodiversität. Erfahrungsbericht zur biologischen Vielfalt in und um Photovoltaik-Freiflächenanlagen. (Renews Spezial Ausgabe 45; S. 35 S.). Agentur für Erneuerbare Energien e. V.
- RAAB, B. (2015). Erneuerbare Energien und Naturschutz—Solarparks können einen Beitrag zur Stabilisierung der biologischen Vielfalt leisten. *Anliegen Natur*, 1(37).
- SCHLEGEL, J. (2021). Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt (Literaturstudie; S. 72). EnergieSchweiz, Bundesamt für Energie BFE.
- THIELE, J. (2024). Kriterien für eine naturverträgliche Standortwahl von Solar-Freiflächenanlagen. KNE.
- ULDRIJAN, D., KOVACIKOVA, M., JAKIMIUK, A., VAVERKOVA, M. D., & WINKLER, J. (2021). Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants. *Ecological Engineering*, 168.

Kontakt

Julia Lüdemann, M.Sc.
ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung
und Bildung gGmbH
Wichernstraße 34, Eingang B
21335 Lüneburg
julia.luedemann@ecolog-institut.de

