

Ökologische Flächenaufwertung im Einvernehmen mit nachhaltiger Stromproduktion durch Photovoltaik- Freiflächenanlagen

**Freie wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des
akademischen Grades**

Master of Engineering (M.Eng)

**in der Studienfachrichtung Landschaftsarchitektur
an der Fachhochschule Erfurt**

vorgelegt bei:

Erstgutachter: Prof. Dr. Stefan Brunzel
Zweitgutachterin: Prof. Dr. Kerstin Wydra

von: Gessert, Stefan
aus: Finsterbergen
am: 05.09.2023

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich die Gelegenheit nutzen, mich bei allen Beteiligten und Mitwirkenden der vorliegenden Arbeit zu bedanken.

Zuallererst gilt Rebecca ein großes Dankeschön. Sie stand mir jederzeit mit Rat und Tat zur Seite und hat maßgebend zum erfolgreichen Abschließen dieser Arbeit beigetragen. Aufopferungsvoll hat sie mir stets den Rücken frei gehalten, viel Zeit in das Korrekturlesen dieser Arbeit investiert und sogar ihre Oma hierfür akquiriert hat.

Außerdem möchte ich meinen zwei Betreuern Prof. Dr. Stefan Brunzel und Prof. Dr. Kerstin Wydra danken. Durch ihre Unterstützung bei der Themenfindung, hilfreichen Konsultationen und angeregten Diskussionen konnte ich einen klaren Fokus mit hoher Aktualität und Themenrelevanz setzen. Ein reger Literaturaustausch mit Frau Wydra war der entscheidende Faktor für das umfangreich angeeignete und angewandte Fachwissen. Durch die Teilnahme an den Modulen von Herrn Brunzel, in der Zeit meines Studiums, konnte dies mit einem hohen und stets verständlich erklärten Wissensschatz komplementiert werden.

Abschließend gilt der Dank meiner Familie, welche während der Zeit meines Studiums immer hinter mir stand und das was ich mache für gut geheißen hat. Gleichmaßen gilt dies für Daniel, welcher ebenfalls stets meine Entscheidung geteilt hat.

Zusammenfassung

Als zentrales Element der zukünftigen Energieversorgung, im Rahmen der Dekarbonisierung, bietet die Photovoltaik ein immenses Potenzial zum Erreichen der Klimaziele. Als ganzheitliche Alternative zu fossilen Brennstoffen bietet Solarstrom durch die stetig voranschreitende Entwicklungsdynamik immer mehr Möglichkeiten zur Stromgewinnung. Die hohe Bandbreite an fossil-freier Energiegewinnung geht mit einem entsprechenden Flächenverbrauch und einer damit verbundenen Flächenkonkurrenz einher. So bieten insbesondere Freiflächen-Photovoltaikanlagen die Möglichkeit einer hohen Effizienz und Stromerzeugung im Versorgungsmaßstab. Eingriffe in den Naturhaushalt und die Umwelt sind hier dennoch unausweichlich.

Aus diesem Grund beschäftigt sich die vorliegende Graduierungsarbeit, zum Erreichen des Masterabschlusses mit den Potenzialen der Synergie von PV-FFA und biodiversitätsfördernden Maßnahmen, um dieser Kontroverse Einhalt zu bieten. Zu diesem Zweck wurde eine umfangreiche Auswertung von themenbezogener Literatur, ähnlich einer Meta-Analyse, durchgeführt, um einen aktuellen Wissensstand von derzeitigen Forschungserkenntnissen zu den Auswirkungen zusammenzutragen. Durch ein entwickeltes Codierungssystem wurde die Literatur mittels Datenmatrix, bezüglich ihrer publizierten Ergebnisse kategorisiert und statistisch ausgewertet.

Auf Grundlage dieser Analyse konnten wertvolle Erkenntnisse bezüglich biodiversitätsfördernder Maßnahmen und ihrer Integration in eine PV-FFA gewonnen werden. Diese stellen eine fundamentale Grundlage für eine im Folgenden entwickelte Handlungsempfehlung, ähnlich eines Kriterienkatalogs, dar. Dabei kommen fünf übergeordnete Phasen zum Tragen, welche durch eine weitere Aufgliederung in zwei Ebenen insgesamt 68 Maßnahmenvorschläge beinhalten. Unter Berücksichtigung und Einhaltung von mindestens 75% dieser Maßnahmen, ist ein Einklang der Biodiversität mit PV-FFA möglich. Infolgedessen kann die Ausarbeitung einer DIN SPEC realisiert werden, um eine Zertifizierung als Biodiversitätsanlage zu etablieren. Am Beispiel der ersten Phase wird das Prinzip noch einmal verdeutlicht und die Validität der Handlungsempfehlung auf ihre Eignung bestätigt.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	I
Zusammenfassung	II
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungsverzeichnis einschl. physikalischer Größen	VI
Abbildungsverzeichnis	VIII
Tabellenverzeichnis	XII
1. Einleitung	1
1.1 Problemstellung und Anlass	1
1.2 Zielstellung und Methodik	3
1.3 Relevanz und aktueller Forschungsstand	4
2. Photovoltaik	6
2.1 Funktionsweise	6
2.2 Anlagentypen und integrierte Landnutzungsformen	8
2.2.1 Agro-Photovoltaik	8
2.2.2 Schwimmende Photovoltaik	9
2.2.3 Photovoltaik auf Moorböden	10
2.2.4 Freiflächen-Photovoltaik	11
3. Biodiversität	12
3.1 Flora	13
3.2 Bestäuber	14
3.3 Avifauna	14
3.4 Säugetiere	15
3.5 Reptilien und Amphibien	15

4. Photovoltaik-Freiflächenanlagen	16
4.1 Stand der Technik	17
4.2 Flächenverbrauch	19
4.3 Rechtliche Grundlagen	20
4.4 Vergütungen nach EEG 2023	22
4.5 Power Purchase Agreement	23
5. Methodisches Vorgehen der Literaturanalyse	24
5.1 Literaturauswahl	24
5.2.1 Allgemein	27
5.2.2 Bewertungssystem	27
5.2.3 Effektstärke	29
5.3 Auswertung der Ergebnisse	31
5.3.1 Jahrestrend	32
5.3.2 Organismengruppen	33
5.3.3 Grundlegende Bewertung	34
5.3.4 Erweiterte Bewertung durch Effektstärken	39
5.3.5 Aussagen zu biodiversitätsfördernden Maßnahmen	41
6. Handlungsempfehlung	42
6.1 Standortwahl	44
6.2 Planung	47
6.3 Bau	51
6.4 Betrieb	52
6.5 Recycling	55
7. Anwendungsbeispiel	56
7.1 Flächenauswahl	57
7.2 Ausblick der Biodiversitäts-Freiflächenanlage	60
8. Diskussion	61

9. Fazit	64
Literaturverzeichnis	i
Gesetze und Vorschriften	xii
Geodaten	xii
Eidesstaatliche Versicherung	xiv
Anhang	xv

Abkürzungsverzeichnis einschl. physikalischer Größen

[ausgenommen der üblichen Abkürzungen gemäß den gültigen Regeln von Orthografie und Grammatik]

ALKIS	Amtliches Liegenschaftskataster-Informationssystem
APV	Agro-Photovoltaik oder Agri-Photovoltaik
B-Plan	Bebauungsplan
BauGB	Baugesetzbuch
BauNVO	Baunutzungsverordnung
BMZ	Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung
BNatschG	Bundesnaturschutzgesetz
bne	Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V.
BSW Solar	Bundesverband Solarwirtschaft e.V.
CAD	Computer-Aided Design
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
DIN	Deutsches Institut für Normung
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
FFH	Flora-Fauna-Habitat
FNP	Flächennutzungsplan
FPV	Floating-Photovoltaik
GIS	geografisches Informationssystem
GW	Gigawatt
GWp	Gigawatt Peak

ha	Hektar
kWh	Kilowattstunde
kWp	Kilowatt Peak
LBO	Landesbauordnung
m ²	Quadratmeter
MW	Megawatt
MWp	Megawatt Peak
NABU	Naturschutzbund Deutschland e.V.
NSG	Naturschutzgebiet
PPA	Power Purchase Agreement
PV	Photovoltaik
PV-FFA	Photovoltaik-Freiflächenanlage
SPA	Special Protectet Area / EU-Vogelschutzgebiet
ThürBO	Thüringer Bauordnung
TLUBN	Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
WEEE	Waste Elecrical and Electronic Equipment
WHG	Wasserhaushaltsgesetz
Wp	Watt Peak

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Technisches Potenzial, Bedarf und Bestand von Photovoltaikleistung in Gigawatt Peak in Deutschland (Quelle: C.A.R.M.E.N. e.V. 2023 nach Wirth 2022)	2
Abbildung 2: Aufbau und Funktionsweise einer herkömmlichen Siliziumzelle (Quelle: Quaschning (2021): Erneuerbare Energien und Klimaschutz)	7
Abbildung 3: Funktionsweise einer Agrar-Photovoltaikanlage (Quelle: Solverde Projektentwicklung GmbH o.J.)	9
Abbildung 4: Anwendungsbeispiel für eine Gründung und Verankerung bei geringer Torfmächtigkeit mit Rammfundamenten (Quelle: Fraunhofer Institut ISE 2023)	11
Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung einer Nahrungskette mit Flora als Produzent und Nahrungsgrundlage (Quelle: eigene Abbildung)	13
Abbildung 6: Vergleich der Stromgestehungskosten von erneuerbaren Energien und konventionellen Kraftwerken in Deutschland. Anlagenkosten sind mit einem minimalen und maximalen Wert je Technologie berücksichtigt. (Quelle: Fraunhofer ISE 2021)	17
Abbildung 7: Montagemöglichkeiten für Freiflächensysteme (Quelle: SL Rack 2022)	18
Abbildung 8: Entwicklung des Landverbrauchs pro installierter Leistung in m ² /kW bei Betrachtung von 91 PV-Freiflächenanlagen verschiedener europäischer Regionen (Quelle: Franz 2023)	20

Abbildung 9: Aus der EEG-Vergütung fallende Erneuerbare Energienanlagen mit einer gesamten installierten Leistung von 51,6 GW bis zum Jahr 2030 (Quelle: Fischer et.al. 2019)	24
Abbildung 10: Länderübersicht aus welchen die betrachteten Forschungsergebnisse stammen (in Orange eingefärbt). Hierbei sind mehrere Breitengrade und Klimazonen betroffen, was zu unterschiedlichen Standortbedingungen und Artzusammensetzungen der untersuchten Anlagen führt. (Quelle: eigene Darstellung)	25
Abbildung 11: Anzahl und Aufteilung der relevanten wissenschaftlichen Literatur, welche in einheitlicher Datenmatrix zusammengeführt wurde (Quelle: eigene Abbildung)	27
Abbildung 12: 5-stufige Codierungsskala zur Bewertung der analysierten Literatur und derer Ergebnisse (Quelle: eigene Abbildung)	28
Abbildung 13: Einteilung der Effektstärken als Bewertungsfaktor (Quelle: eigene Abbildung)	30
Abbildung 14: Die Regressionsgerade. Das Säulendiagramm zeigt die Anzahl ausgewerteter Fachliteratur und deren Erscheinungsjahr für die repräsentative Auswertung der Jahrestrends. (Quelle: eigene Abbildung)	32
Abbildung 15: Balkendiagramm. Anzahl der ausgewertete Fachliteratur in Bezug auf betrachtete Organismengruppen (Quelle: eigene Abbildung)	33

Abbildung 16: Auswertung nach 5-stufiger und grundlegender Codierungsskale ohne mit 0 bewertete Fachliteratur (8) (Quelle: eigene Abbildung)	35
Abbildung 17: Vergleich der Energieflussdynamik bei einem bewachsenen Ökosystem und einer PV-FFA unter Annahme gleicher Mengen an einfallender Energie (Quelle: Barron-Gafford et.al. 2016)	37
Abbildung 18: Erweiterte Auswertung durch Multiplikation der grundlegenden Codierung mit einer Effektstärke von 1 - 5 entsprechend der wissenschaftlichen Bedeutung der einzelnen Fachliteratur (Quelle: eigene Abbildung)	40
Abbildung 19: Anzahl der ausgewerteten Fachliteratur bezüglich konkreter Aussagen zu Maßnahmen oder Maßnahmenvorschlägen (Quelle: eigene Abbildung)	41
Abbildung 20: Grundlegendes Anwendungsprinzip des Kreislaufsystems mit 5 übergeordneten Phasen (Quelle: eigene Abbildung)	44
Abbildung 21: Maßnahmenkatalog der ersten Phase Standortauswahl (Quelle: eigene Abbildung)	45
Abbildung 22: Maßnahmenkatalog der zweiten Phase Planung (Quelle: eigene Abbildung)	48
Abbildung 23: Maßnahmenkatalog der dritten Phase Bauen (Quelle: eigene Abbildung)	51
Abbildung 24: Maßnahmenkatalog der vierten Phase Betrieb (Quelle: eigene Abbildung)	53

Abbildung 25: Maßnahmenkatalog der fünften Phase Recycling (Quelle: eigene Abbildung)	55
Abbildung 26: Kartografische Darstellung der mittleren Jahresglobalstrahlungs- summe in kWh/m ² zwischen 1990 und 2019 mit Kennzeichnung des Betrachtungsgebietes bei Altenburg (grüner Kreis) (Quelle: Energieatlas Thüringen)	57
Abbildung 27: Dargestellte Landnutzung in 5 Kategorien unter Hinzunahme der Gemeindeabgrenzungen und Darstellung der näher zu betrachte- ten Flächen (grüner Kreis) (Quelle: Kartendienst des TLUBN)	58
Abbildung 28: Filterung einer möglichen Potenzialfläche (orangener Kreis) unter Hinzunahme von Naturschutzdaten als Ausschlusskriterien (Quelle: Kartendienst des TLUBN)	59
Abbildung 29: Endgültiges Herausstellen der Potenzialfläche als Planungs- gebiet unter Berücksichtigung weiterer Parameter (Quelle: eigene Abbildung)	60
Abbildung 30: Umsetzung des Kriterienkatalogs anhand der ersten Phase Standortauswahl (Quelle: eigene Abbildung)	61

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mögliche Kompensationsmaßnahmen bzgl. Beeinträchtigungen durch den Bau eine PV-FFA

(Quelle: Deutscher Bundestag 2019) 22

Tabelle 2: Datenmatrix

(Quelle: eigene Ausarbeitung) xv

In der vorliegenden Arbeit wird die allgemein gültige Schreibweise Photovoltaik mit „Ph“ verwendet. Nach der neuen Rechtschreibreform ist zudem die Schreibweise Fotovoltaik mit „F“ gültig. Hierauf wird jedoch aus allgemein verständlichen Gründen verzichtet. Aufgrund der englischen Schreibweise photovoltaic und der geläufigen Abkürzung PV werden Missverständnisse ausgeschlossen.

1. Einleitung

1.1 Problemstellung und Anlass

„Als saubere und kosteneffiziente Technologie zur Stromerzeugung ist die Photovoltaik ein unverzichtbarer Eckpfeiler zur Umsetzung der Klimaziele. Ein verstärkter Ausbau der Solarenergie ist damit auch im Interesse des Natur- und Artenschutzes, für die der Klimawandel zu den größten Bedrohungen zählt.“
(NABU & BSW 2021, S. 3)

Die zunehmende Notwendigkeit erneuerbare Energien als ganzheitliche Alternative hingegen fossiler Brennstoffen zu implementieren, lässt die Photovoltaik (PV) ein zentrales Element zukunftsfähiger Energieversorgung einnehmen. Durch den derzeitigen Stand der Technik und die rasante Weiterentwicklung bieten Photovoltaikanlagen ein immenses Potenzial im Rahmen der Transformation des globalen Energiesystems. Der Stromsektor ist dabei die Grundlage für viele weitere alltagsprägende Bereiche, wie Wärmeversorgung oder Mobilität. *„Insgesamt weist der Wärmeverbrauch den größten Anteil des Endenergieverbrauchs (49,6 Prozent) vor Verkehr (29,6 Prozent) und Strom (20,8 Prozent) auf.“* (Agentur für Erneuerbare Energien e.V. 2019) Erneuerbarer Strom muss also gleichfalls für diese Sektoren nutzbar gemacht werden, um alle fossilen Brennstoffe zu ersetzen. Aus der Aktualität des russischen Angriffskriegs in der Ukraine heraus ist eine Unabhängigkeit von fossilen Energieimporten umso wichtiger (Die Bundesregierung 2023). Für Deutschland gesprochen, besteht das Ziel der Treibhausgasneutralität bis zum Jahr 2045, was die klimagerechte Stromversorgung zu einer Schlüsselrolle macht und einen schnelleren dynamischen Kapazitätsausbau dringend erfordert (BMWK 2023, S. 4). *„Bis 2030 sollen mindestens 80 Prozent des Stromverbrauchs in Deutschland aus erneuerbaren Energien stammen.“* (Die Bundesregierung 2023). Die Bandbreite an Nutzungsmöglichkeiten für Sonnenenergie ist dabei enorm. Dachanlagen, Fassadenanlagen und aufgeständerte Freiflächenanlagen sind die geläufigsten Formen.

Neue Möglichkeiten, wenn auch noch nicht ausreichend erforscht und ausgereift, wie schwimmende Photovoltaikanlagen und Agrar-Photovoltaik, erweitern das Spektrum für die Stromerzeugung durch Sonnenstrahlen. Das technische Potenzial und die damit verbundene theoretische Leistung für Deutschland wird durch die Datenerfassung nach Wirth 2022 deutlich und liegt bei ca. 4600 GWp (Gigawatt Peak) (siehe Abbildung 1).

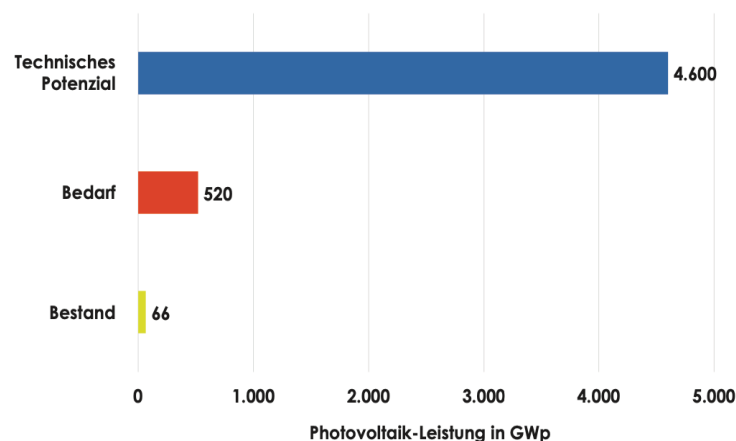


Abbildung 1: Technisches Potenzial, Bedarf und Bestand von Photovoltaikleistung in Gigawatt Peak in Deutschland
(Quelle: C.A.R.M.E.N. e.V. 2023 nach Wirth 2022)

Doch das Streben nach einer dekarbonisierten, sprich fossil-freien, Energieversorgung bringt in gleichem Maße Konflikte und neue Herausforderungen mit sich. So stellen z.B. Photovoltaik-Freiflächenanlagen stets einen Eingriff in den Naturhaushalt und das Landschaftsbild dar (NABU & BSW 2021, S. 6). Aus diesem Grund sind innovative Lösungsansätze gefragt, um einen konstruktiven Umgang mit dem Spannungsfeld zwischen Energiewende und Naturschutz, als zentrale Problematik, zu entwickeln. Im Rahmen der vorliegenden wissenschaftlichen Arbeit wird dabei vor allem die Frage der Flächennutzungskonkurrenz im Bezug auf Freiflächen-Photovoltaikanlagen und Biodiversität thematisiert. Wie können dementsprechend kompatible Landnutzungen gestaltet werden, welche eine Symbiose zur Erhaltung und Förderung natürlicher Ökosystemdienstleistungen im Einklang mit erneuerbarer Energieversorgung durch Solarstrom gewährleisten?

1.2 Zielstellung und Methodik

Um die Ziele des Pariser Abkommens¹ einzuhalten und somit den globalen Temperaturanstieg einzudämmen, ist ein Ausbau von Erneuerbaren Energien unerlässlich. Neben der Windenergie nimmt insbesondere die Photovoltaik eine tragende Rolle ein. Eine effiziente und dem Versorgungsmaßstab gerecht werdende Nutzung bringt gleichermaßen einen hohen Freiflächenbedarf mit sich. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich aus diesem Grund mit der zentralen Fragestellung, wie sich der Ausbau von Freiflächen-Photovoltaikanlagen, im Rahmen der Energiewende, auf Umwelt- und Naturschutz auswirkt. Aus dieser Zielstellung hervorgehend leiten sich folgende konkrete Forschungsfragen ab:

1. Können Photovoltaik-Freiflächenanlagen eine hinreichende, dem Versorgungsmaßstab gerecht werdende Stromversorgung gewährleisten?
2. Deuten bisher gewonnene Erkenntnisse aus Forschung und Monitoring auf eine positive Biodiversitätsentwicklung in bereits vorhandenen Photovoltaik-Freiflächenanlagen hin?
3. Welche Maßnahmen müssen beachtet und umgesetzt werden, um eine Photovoltaik-Freiflächenanlage biodiversitätsfördernd auszubauen?

Nach kurzer Erläuterung der Thematik Biodiversität und der Technologie Photovoltaik bildet eine umfangreiche internationale Literaturstudie die Grundlage um die Folgen des Kapazitätsausbaus für die biologische Vielfalt zu verstehen. Hierbei werden bisher gewonnene Erkenntnisstände und Forschungsergebnisse zusammen getragen und evaluiert, vergleichbar einer Meta-Analyse als quantitative Forschungsmethode. Ein eigens entwickeltes Bewertungssystem kategorisiert alle erfassten Literaturquellen nach positiven und negativen Auswirkungen sowie ihrer Aussagekraft bezogen auf angewandte Forschungsmethoden und Betrachtungszeiträume. Die damit integrierte und als Multiplikator dienende Effektstärke soll als Indikator für die Bedeutsamkeit der Forschungsergebnisse angewandt werden und die getroffenen Kernaussagen nach ihrer Gewichtung stützen. Aufbauend darauf soll eine Handlungsempfehlung

¹ 2015, völkerrechtlich und verbindlich vereinbarte Einigung der Staatengemeinschaft die Erderwärmung auf unter 2°C gegenüber vorindustriellen Niveau zu begrenzen (Umweltbundesamt 2021).

erarbeitet werden, welche Maßnahmen und Konzepte integriert, Freiflächen-Photovoltaikanlagen standortbezogen biodiversitätsfördernd zu gestalten und eine umweltverträgliche Standortsteuerung zu implementieren. Als Art Kriterienkatalog beinhaltet dies sämtliche damit verbundenen Phasen, angefangen bei der Planung, über den Bau, das Betreiben und Pflegen der Anlagen. Zur Überprüfung der Validität dieser Methodik folgt ein abschließendes Anwendungsbeispiel für die Planung einer „Biodiversitäts-Freiflächenanlage“.²

1.3 Relevanz und aktueller Forschungsstand

Das notwendige Voranbringen der globalen Transformation des Energiesystems lässt die Forschungsarbeiten im Bereich der erneuerbaren Energien immer weiter voran schreiten. Mittlerweile gibt es zahlreiche Systeme zur Stromerzeugung. Die Photovoltaik hat sich durch die vielseitig einsetzbaren Möglichkeiten und Größenordnungen zu einer der wertvollsten Technologien mit enormem Potenzial entwickelt. *„Photovoltaik (PV) wird in unserer nachhaltigen Energiezukunft eine zentrale Rolle spielen.“* (Fraunhofer ISE 2023) Insbesondere im Vergleich zur Energiegewinnung durch fossile Brennstoffe belegen zahlreiche Fakten mehrerer Quellen einen erheblich geringeren CO₂-Fußabdruck durch PV-Anlagen. Das CO₂-Äquivalent/kWh³ liegt dabei für die Photovoltaik bei ca. 14 - 73g. Dies entspricht einem 10 bis 53mal niedrigeren Wert, als bei der Verbrennung von Öl (Tawalbeh et.al. 2021). Im Auftrag des Umweltbundesamtes wurde 2021 ein Abschlussbericht publiziert, welcher von 43 - 63g CO₂-Äquivalent/kWh spricht (Hengstler et.al. 2021). Durch neuartige und weiterentwickelte Herstellungsmaterialien, -prozesse und Recyclinginnovationen ist davon auszugehen, dass dieser Wert im Laufe der Jahre weiterhin sinken wird. Dabei können PV-Module beispielsweise an oder auf Gebäuden, auf Freiflächen oder darüber hinaus dem Wasser installiert werden. Allein in den Vereinigten Staaten hat die Zahl von solaren Energieanlagen über die vergangenen 20 Jahre eminent zugenommen. Im Betrachtungszeitraum 2010 bis 2019 wird dabei eine Steigerung von über 80% angenommen (Chock et.al. 2020, S. 2). *„Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2023 gibt bis 2030 ein Ausbauziel*

² Gemeint ist dabei die Symbiose aus einer Freiflächen-Photovoltaikanlage mit integrierten biodiversitätsfördernden Maßnahmen und Strukturelementen.

³ Ausstoß aller verrechneten klimarelevanten Treibhausgase pro Kilowattstunde - nachfolgend in Gramm.

von 215 Gigawatt (GW) für die Photovoltaik vor und damit im Vergleich zum Ausbaustand Ende 2022 ungefähr eine Verdreifachung der installierten Leistung in den kommenden acht Jahren.“ (Umweltbundesamt 2023). Die Komplexität der damit verbundenen Auswirkungen und Gefährdungsursachen für Flora und Fauna sind diesbezüglich jedoch noch nicht hinreichend erforscht und geklärt. In der Wissenschaft lassen sich Divergenzen in Bezug auf Fragmentierung von Biotopen oder Strukturverarmungen der Landschaft erkennen. Dabei bietet der Ausbau großflächiger PV-Anlagen adäquate Möglichkeiten, die Ansprüche von Ökosystemdienstleistungen zu integrieren, diese zu fördern und gleichzeitig eine nachhaltige Stromerzeugung zu implementieren. Gerade für landwirtschaftliche Betriebe kann der volumenstarke Ausbau von PV-Freiflächenanlagen ein attraktives zusätzliches Standbein sein mit der Chance, die unter landwirtschaftlicher Vornutzung stehenden Flächen ökologisch signifikant aufzuwerten und standortabhängige Arten zu fördern. Wichtig für das Verständnis bisheriger Kenntnisstände ist es, einen aktuellen Überblick über bereits gewonnene Erkenntnisse und Forschungsergebnisse bzw. Forschungsbeiträge zu gewinnen und diese zusammenzuführen. Hierbei dürfen vor allem jüngste Initiativen zur doppelten Flächennutzung und der damit einhergehenden Akzeptanzsteigerung nicht außer Acht gelassen werden. Als gegenwärtiges Beispiel sei hier das Projekt „EULE“ der Regionalwerke Bodenkirchen in Zusammenarbeit mit der Hochschule Weihenstephan-Triesdorf sowie Prof. Schaller UmweltConsult genannt. Es soll ein dem standortentsprechendes Ökosystem, in die vom Menschen geprägte Solarlandschaft, durch integrierte Strukturvielfältigkeit gefördert werden (DBU, 2020). Der Zugang zu solarer Energie ist dabei in allen Ländern, Klimazonen und Breitengraden der Erde gewährleistet. Dieser Umstand bringt dementsprechend eine Mannigfaltigkeit an Möglichkeiten, dezentrale Kraftwerkstrukturen auf ein benötigtes Maximum auszubauen, mit sich. Gleichzeitig verbirgt sich aber auch eine hohe Komplexität in Bezug auf Geografie und standortspezifische Artzusammensetzungen, welche es zu verstehen gilt. Fakt ist jedoch, dass *„ohne eine globale Energiewende [...] der Klimawandel nicht gemeistert werden“* kann. (BMZ 2023)

2. Photovoltaik

Der Fokus für die vorliegende wissenschaftliche Arbeit liegt nicht auf der technischen Fragestellung der Funktionsweise von Photovoltaikanlagen. Trotz dessen soll im folgenden Textabschnitt kurz darauf eingegangen werden, um ein allgemeines Verständnis, grundlegendes Wissen und ein Gespür für das zugrunde liegende Potenzial zu vermitteln. Nach einer überblickenden Erläuterung der Funktionsweise von Photovoltaiksystemen, folgt die Vorstellung der geläufigsten Anlagentypen und ihrer Formen der Landnutzung. Hierbei liegt das Hauptaugenmerk auf den Freiflächenanlagen, welche das bestimmende Element dieser Arbeit darstellen und das meiste Potenzial für eine umfassende ökologische Aufwertung innerhalb ihres Flächenbedarfs mit sich bringen.

2.1 Funktionsweise

Eine Solarzelle dient im Wesentlichen dazu, elektrischen Strom durch Sonnenenergie zu generieren. Dafür werden Halbleiterwerkstoffe, wie üblicherweise Silizium benötigt, um die Funktionsweise über zwei Ebenen zu gewährleisten. Dabei können sich vorhandene Elektronen⁴ auf der einen Ebene frei bewegen, wohingegen sie auf der anderen Ebene gebunden sind. Um ein benötigtes Ungleichgewicht an Elektronen zu erzeugen, wird eine Ebene mit Elementen wie Bor und Phosphor versetzt. Trifft Sonnenlicht, in Form von Lichtteilchen oder auch Photonen genannt, auf den Halbleiter, fangen die Elektronen an die Ebene zu wechseln. Die Elektronen werden an einem Frontkontakt gesammelt und fließen über einen äußeren Stromkreis zur ursprünglichen Ebene zurück. Dabei geben sie elektrische Energie ab und der Vorgang beginnt von neuem (Quaschnig 2021). Zum besseren Verständnis dient die nachfolgend stehende Abbildung 2 (S. 7) nach Quaschnig (2021). Das zuvor erläuterte Wirkungsprinzip zeigt, dass PV-Anlagen Strom bezogen auf ihre Fläche erzeugen. Dies bedeutet im Umkehrschluss, eine größere Fläche von installierten Solarmodulen hat gleichzeitig auch eine höhere Leistungsfähigkeit. Auf einem Hektar (ha) Fläche kann ca. 1 Megawatt (MW) Strom erzeugt werden. Vergleicht man dies mit einer Biogasanlage, liegt die Anbaufläche für den benötigten Mais zur Erzeugung der selben Leistung bei

⁴ Negative Ladungsträger.

ca. 50 ha (BUND Bayern 2022). Somit wird die deutlich höhere Flächeneffizienz erkennbar. Außerdem bedarf es keinerlei nachwachsender Rohstoffe, Düngereinsatz oder Transportverkehr um den Prozess im Kreislauf zu halten. Hinzu kommt die ständig voranschreitende internationale Weiterentwicklung der Technik. Durch Effizienzsteigerung, Automatisierung und Standardisierung haben sich die Kosten in den letzten Jahren im Vergleich zu einer jeweiligen Kapazitätsverdopplung um 23% verringert (Victoria et.al 2021). Gerade im Bereich der Effizienzsteigerung werden immer mehr und immer vielfältigere Strategien beschrieben. Da Silizium-Solarzellen mehr als 95% der installierten PV-Kapazität ausmachen, ist das wirtschaftliche und voranschreitende Interesse hoch. Derzeit wird ein durchschnittlicher Modulwirkungsgrad⁵ von ca. 20% erreicht. Bis 2030 wird ein Anstieg auf 22,5% prognostiziert, was unweit dem bisherigen Rekordwirkungsgrad von 26,7% liegt (pv magazine 2023). In Anbetracht dessen, dass Siliziumdioxid⁶ als Ausgangsmaterial für Solarsilizium, das am zweithäufigsten vorkommende Element der Erde ist, lässt sich das enorme Potenzial von PV-Modulen erneut unterstreichen.

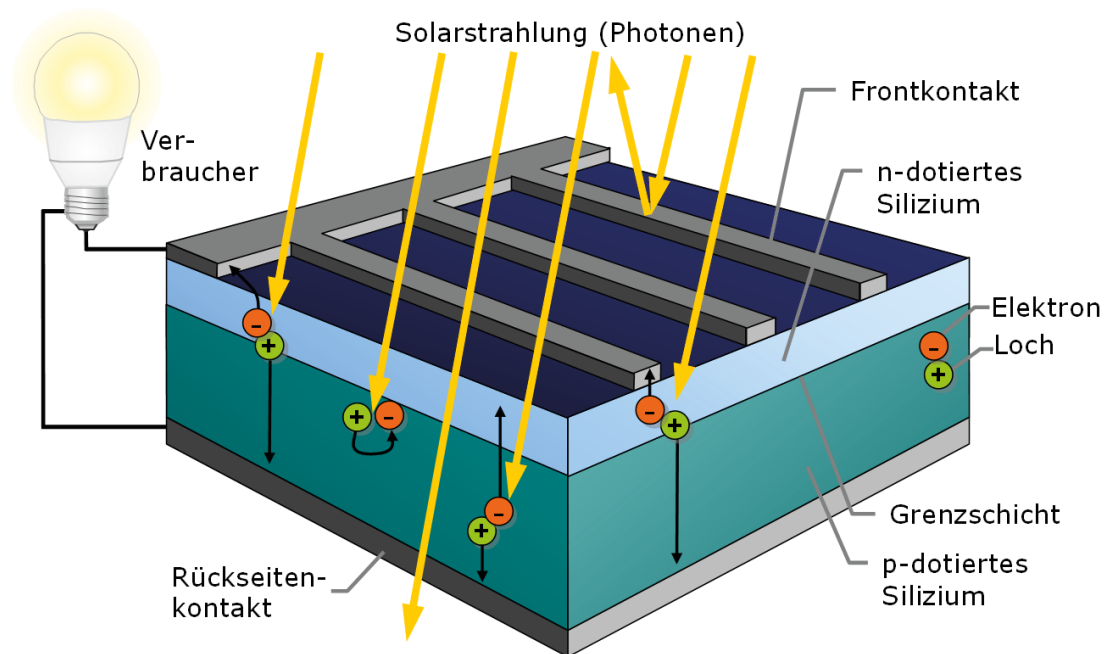


Abbildung 2: Aufbau und Funktionsweise einer herkömmlichen Siliziumzelle
(Quelle: Quaschnig (2021): Erneuerbare Energien und Klimaschutz)

⁵ Verhältnis zwischen der gesamten einfallenden Sonnenergie und der abgegebenen elektrischen Leistung.

⁶ Als Bezug: Sand besteht zu Großteilen aus Siliziumdioxid (DaNa 2023).

2.2 Anlagentypen und integrierte Landnutzungsformen

Wie bereits im Vorfeld erwähnt, gibt es eine Vielzahl von Möglichkeiten PV-Systeme zielorientiert und wirkungsvoll zu installieren. Die bekanntesten Nutzungsformen sind dabei neben Dachanlagen die Freiflächenanlagen, welche man häufig entlang von Autobahnen oder Bahntrassen sehen kann. Doch das Entwicklungspotenzial bestätigt sich auch hier wieder durch verschiedene Systeme. Integriert in bereits vorhandene Landschaftsnutzungen sollen in diesem Rahmen die Anlagentypen Agro-Photovoltaik, schwimmende Photovoltaik und Photovoltaik auf Moorböden erwähnt werden. Da jede Energiegewinnung mit Naturverbrauch verbunden ist, zielen diese Formen der erneuerbaren Energien auf eine vorausschauende Planung ab, um die Funktionsfähigkeit von Ökosystemen in unserer intensiv genutzten Kulturlandschaft nicht zusätzlich zu gefährden (NABU 2021). Unter diesem Gesichtspunkt kann und soll aus der bestehenden Flächenkonkurrenz eine Flächensymbiose entstehen, mit dem Ziel der Integration von PV-Systemen in bestehende Nutzungskonzepte, um dabei einen naturschutzfachlichen Mehrwert zu erzielen. Die folgenden Unterpunkte dienen dem Zweck die genannten Nutzungsformen kurz zu beschreiben.

2.2.1 Agro-Photovoltaik

Durch die Möglichkeit Agrarland gleichermaßen auch als Fläche einer Solaranlage zu nutzen, bietet die Agro-Photovoltaik (APV)⁷ eine innovative Technologie zur Doppelnutzung von Flächen. Durch die Koexistenz von Solarmodulen und darunter oder dazwischen liegenden Feldfrüchten wird eine gemeinsame Lichtnutzung angestrebt. Eine spezielle und erhöhte Aufständigung der Modulreihen gestattet weiterhin das Befahren und Bewirtschaften der Ackerflächen. Ein gutes Beispiel hierfür liefert die Solverde Bürgerkraftwerke Energiegenossenschaft eG, welche in Lüptitz eine Agrar-Photovoltaikanlage mit Mehrfachnutzung initiieren möchte (siehe Abbildung 3, S. 9). Die Solarmodule begünstigen durch zeitweilige Verschattungen eine verringerte Verdunstung, was insbesondere in Dürreperioden für viele Kulturen von Vorteil ist (NABU 2021). Demnach werden schnell die positiven Effekte bezüglich zunehmender Folgen des Klimawandels deutlich. Außerdem können die Landwirte den erzeugten

⁷ Ferner Agri- oder Agrar-Photovoltaik genannt.

Strom selber nutzen, einspeisen oder direkt vermarkten. Durch die aufwendige Umsetzung und kostenintensive Anschaffung ist eine umfassende Aussage in Sachen Wirtschaftlichkeit jedoch noch nicht möglich. Der Anlagentyp befindet sich noch in der Pilotphase, sodass nicht klar ist, ob sich Agro-Photovoltaik künftig durchsetzen wird (Photovoltaik.one 2022).

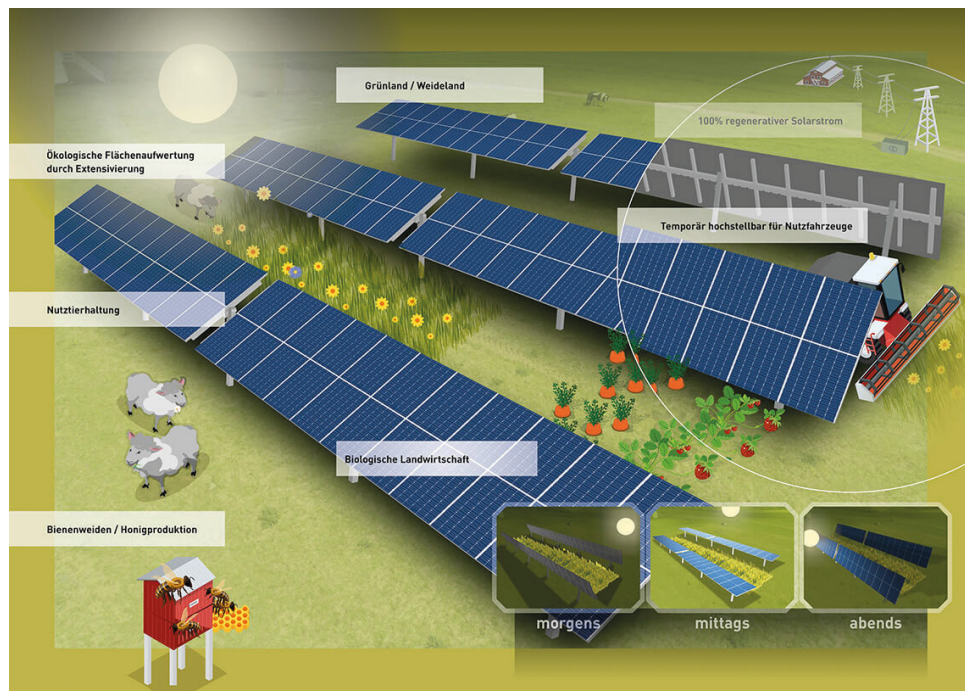


Abbildung 3: Funktionsweise einer Agrar-Photovoltaikanlage
(Quelle: Solverde Projektentwicklung GmbH o.J.)

2.2.2 Schwimmende Photovoltaik

Unter der Bezeichnung Floating Photovoltaik (FPV) werden Module bezeichnet, welche auf dem Wasser installiert werden. Dabei handelt es sich überwiegend um stehende und künstlich angelegte Süßwasser-Gewässer wie Baggerseen in Tagebaugebieten. Im Wesentlichen sind dabei die PV-Module auf Schwimmkörpern montiert, welche wiederum am Gewässerufer oder auf dem Gewässergrund verankert sind (Seeger & Hartmann 2020). Über einen Wechselrichter wird der erzeugte Strom zum Endverbraucher weitergeleitet oder in das Netz eingespeist werden. Dabei können vor allem laufende Tagebauunternehmen profitieren. Diese haben meist einen hohen Energieverbrauch, welcher durch FPV-Systeme direkt gedeckt werden kann. Die neuartige und sehr kostenintensive Technologie verfügt über ein

sehr hohes Stromerzeugungspotenzial. Dies wird insbesondere durch die eingehende Symbiose der Anlage mit dem Gewässer hervorgerufen. Die Module erfahren einen Kühlungseffekt, wodurch sie eine höhere Energieeffizienz vorweisen. Gleichzeitig werden bestehende Landnutzungskonflikte entschärft. Abgrabungsgewässer haben in mehreren Fällen einen hohen ökologischen Mehrwert. Die Auswirkungen diesbezüglich lassen sich bisher nur vermuten und konnten aufgrund der jungen Technik noch nicht langfristig und nur ungenügend erforscht werden. Durch die Überbauung und den verminderten Lichteinfall kann die Gewässerökologie stark gestört werden. Hierzu zählen unter anderem reduzierte Photosyntheseprozesse oder mikroklimatische Veränderungen, was dazu führt, dass die Gewässer ihre bisherigen Lebensraumfunktionen nicht mehr voll erfüllen. Hinzu kommen regelmäßige Wartungsfahrten mit Booten (NABU 2021). Erste Forschungsergebnisse, der Firma BayWa r.e. für eine der größten Anlagen Europas und ihrer Auswirkungen auf die Umwelt liefern bisweilen keine negativen Entwicklungen. Um die Auswirkungen auf Flora und Fauna dieser Systeme also vollends abschätzen zu können, sind zunächst Langzeitstudien erforderlich, um das in §36 Wasserhaushaltsgesetz verankerte Verschlechterungsverbot zu gewährleisten.

2.2.3 Photovoltaik auf Moorböden

Für Anlagen zur PV-Stromerzeugung auf wiedervernässten Moorböden wird die Bezeichnung Moor-PV verwendet. Hierbei handelt es sich um ehemals für die Landwirtschaft trocken gelegte Moorflächen. Moorflächen innerhalb naturschutzfachlicher Schutzgebiete sind dabei jedoch ausgeschlossen. Durch die Wiedervernässung können Moore ihre extrem wichtige und hochwirksame Funktion als Kohlenstoffspeicher wieder aufnehmen. Knapp 7% der gesamten Treibhausgasemissionen in Deutschland stammen derzeit von entwässerten Moorböden (Umweltbundesamt 2023). Um die zum Ziel gesetzte Klimaneutralität bis 2045 in Deutschland zu erreichen, spielen ebenso Moore eine wichtige Rolle. Die Wiedervernässung dieser ist unabdinglich. Werden diese Flächen anschließend mit einer Doppelnutzung durch aufgeständerte PV-Anlagen (siehe Abbildung 4, S. 11) belegt, kann das für landwirtschaftliche Betriebe eine vielversprechende Möglichkeit werden und zugleich Flächendruck mit

Landnutzungskonflikten vermindern (Fraunhofer ISE 2023). Allerdings gibt es sowohl in Deutschland als auch international kaum Pilotprojekte, sodass der Anlagentyp bisher unzureichend erforscht ist. Nichtsdestotrotz besteht hier ein sehr großes Potenzial, Klimaschutzziele mit erneuerbarer Stromproduktion zu kombinieren und gezielte moorbezogene Artenschutzmaßnahmen auf wiedervernässten Moorböden zu implementieren.

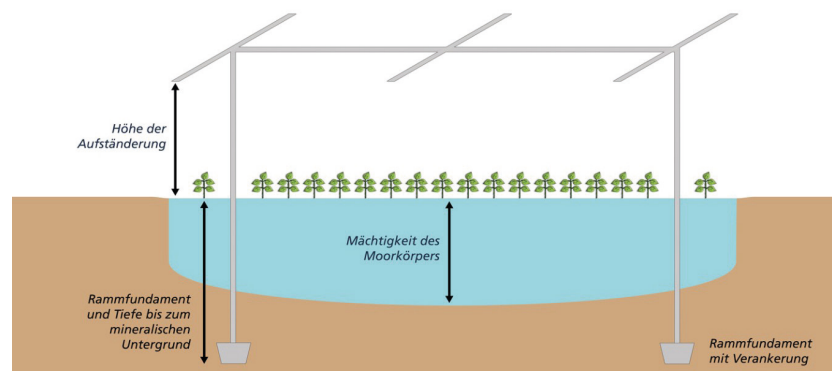


Abbildung 4: Anwendungsbeispiel für eine Gründung und Verankerung bei geringer Torfmächtigkeit mit Rammfundamenten (Quelle: Fraunhofer Institut ISE 2023)

2.2.4 Freiflächen-Photovoltaik

Als Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) oder auch Solarparks werden eine Vielzahl an ebenerdig aufgeständerten Solarmodulen auf großen Flächen bezeichnet. Diese sind genehmigungspflichtig und werden meist auf nicht mehr genutzten landwirtschaftlichen Flächen oder Konversions-Flächen⁸ errichtet. Die Installation auf großen, nicht (mehr) genutzten Flächen bietet den Vorteil der bestmöglichen Ausrichtung mit dem effizientesten Winkel zum Sonnenstand. Dabei gibt es die Möglichkeiten einer festen Bauweise oder nachgeführter Systeme. Letzteres zeichnet sich durch eine dem Sonnenverlauf angepasste und mitlaufende Ausrichtung ab. Durch eine hohe Lebensdauer und Flächengröße kann diese Form der Photovoltaik zu sehr hohen und lang anhaltenden Erträgen führen. Von einer wirtschaftlichen Betriebsform wird ab einer Flächengröße von 20.000 Quadratmetern gesprochen (Solarenergie.de 2023). Technische

⁸ Flächen, die einer Nutzungsänderung unterliegen (z.B. ehemalige Industrie- oder Militärfächen).

Vorteile bietet beispielsweise ein geringer Reparatur- und Wartungsaufwand sowie eine einfache Installationshandhabung im Vergleich zu Windenergieanlagen. Da die vorliegende Arbeit im Wesentlichen auf die Behandlung dieser Form der Photovoltaikanlagen abzielt, wird die Technologie im *Kapitel 4 Photovoltaik-Freiflächenanlagen* noch einmal vollumfänglich aufgegriffen und ausgeführt.

3. Biodiversität

Da die zentrale Fragestellung grundsätzlich auf das Potenzial der ökologischen Flächenaufwertung und Biodiversitätsförderung in PV-FFA abzielt, soll hier im Vorfeld ein kurzer Einblick in die Thematik Biodiversität geboten werden. Darüber hinaus werden neben den allgemeingültigen Gesichtspunkten die verschiedenen übergeordneten Organismengruppen angeschnitten, welche durch die im *Kapitel 5* beschriebene Methodik der Meta-Analyse auswertungsrelevant sind. Außerdem müssen diese für spätere Planungsprozesse betrachtet werden.

„Als Biodiversität bezeichnet die Biodiversitätskonvention der Vereinten Nationen die Vielfalt aller lebenden Organismen, Lebensräume und Ökosysteme auf dem Land, im Süßwasser, in den Ozeanen sowie in der Luft“ (Max Planck Gesellschaft 2023). Mit dieser Definition wird die Begrifflichkeit der Biodiversität im Wesentlichen zusammengefasst. Die Verflechtung und Abläufe der einzelnen Elemente stellen jedoch eine weitaus komplexere Thematik dar. So setzen sich Ökosysteme aus Organismen oder Organismengruppen und ihrem Umfeld, dem Lebensraum zusammen. Dadurch ergeben sich natürliche, räumliche Strukturen, welche zeitlich bedingten Stoffkreisläufen unterliegen. Verschiedene Arten bzw. Artzusammensetzungen erfüllen in dieser Symbiose unterschiedliche Funktionen. Manche Insekten beispielsweise sind dabei für die Bestäubung von Pflanzen zuständig, andere wiederum bauen produzierte Abfallstoffe ab. Somit werden Wirkungen auf ein Ökosystem erzielt, welche im fachlichen Sprachgebrauch Ökosystemdienstleistungen genannt werden. Wissenschaftler gehen davon aus, dass diese Ökosystemdienstleistungen mit einem Wert von 3,8 Milliarden Euro in Deutschland zu vergleichen sind (Lippert C. et.al. 2021). Weiterführend entsteht so eine artenreichere und vielfältigere Bandbreite der Flora, was zu einem höheren Maß an Kohlenstoffspeicherung und -umsetzung führt und mehr Produzenten als Nahrungsgrundlage bietet (siehe Abbildung 5, S.13).

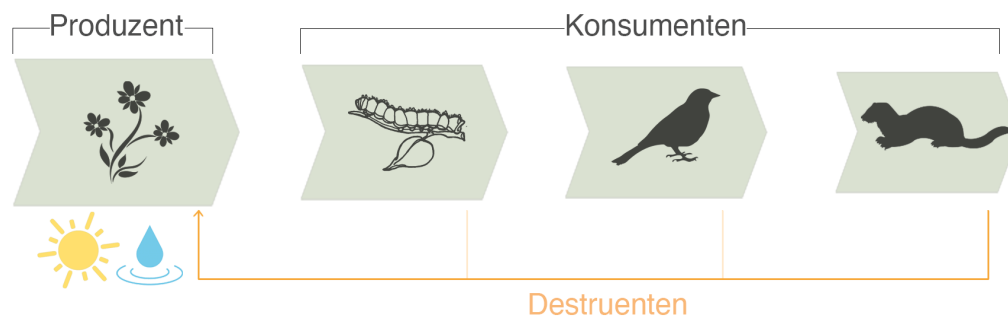


Abbildung 5: Vereinfachte Darstellung einer Nahrungskette mit Flora als Produzent und Nahrungsgrundlage
(Quelle: eigene Abbildung)

Insbesondere die Kohlenstoffspeicherung hat im Zuge des Klimawandels einen weitreichenden positiven und essenziellen Effekt für das Entgegenwirken und die Regulierung der Erderwärmung. Den Kern der ökologischen Flächenaufwertung bildet folglich der Erhalt bzw. die Schaffung von Ökosystemen, Grundlage für die Artenvielfalt und somit weitreichenden Ökosystemdienstleistungen. Eine Symbiose aus nachhaltig produziertem Strom und integrierten Strukturen zur Biodiversitätsförderung scheint demzufolge logisch.

3.1 Flora

Wie bereits beschrieben, bildet eine artenreiche Flora als Produzent, Nahrungsgrundlage und Kohlenstoffspeicher die Basis für ein funktionierendes Ökosystem. Hierbei ist der Bestand und die Gesamtheit aller Pflanzengesellschaften gemeint, welche sich standort- bzw. regionsspezifisch ausbilden. Die Signifikanz in der vorliegenden Arbeit zeichnet sich durch die verschiedenen Eigenschaften ab, welche eine vielfältige und artenreiche Gesamtheit standortabhängiger Pflanzen mit sich bringen. Zudem können diese neben den angesprochenen Funktionen Versteck-, Nist- und Brutmöglichkeiten sein. Da jede Pflanze abhängig von Temperatur, Wasserverfügbarkeit und Sonneneinstrahlung ist, muss dies in der später folgenden Handlungsempfehlung für die Planung einer PV-FFA zur Biodiversitätsförderung beachtet werden. Die Abhängigkeiten müssen dabei keinen negativen Effekt haben, sondern können sich zu Nutze gemacht werden.

3.2 Bestäuber

Die Ökosystemdienstleistung sämtlicher Bestäuber stellt im Rahmen dieser Arbeit und der Förderung von biodiversen Strukturen eins der Kernelemente dar. Die Vermehrung von fast 88% aller Pflanzen auf der Erde wird durch Bestäuber sichergestellt (NABU o.J.). Des Weiteren sind sie Nahrungsgrundlage und bilden wichtige Bausteine der Nahrungskette. Der Begriff Bestäuber wird in diesem Kontext aus einer Zusammenfassung mehrerer Arten gebildet. Hierzu zählen in erster Linie Schmetterlinge, Bienen und Wildbienen, da diese Forschungsgrundlage der betrachteten Studien sind. Durch den, hauptsächlich durch industrielle Landwirtschaft hervorgerufenen, anhaltenden globalen Rückgang vieler Bestäubergruppen ist eine Förderung der Strukturvielfalt maßgebend. Im Gesetz zum Schutz der Insektenvielfalt in Deutschland sind diesbezüglich bereits Lösungsansätze, wie die Schaffung von Streuobstwiesen, Steinriegeln und Trockenmauern verankert, welche auch in Planungsprozessen zu PV-FFA Verwendung finden können. Besonders in landwirtschaftlich geprägten Regionen kann dies zu einem immensen Vorteil führen, da die Bestäuberleistung für großflächig angebaute Ackerkulturlpflanzen oder Gemüseanbau unerlässlich ist.

3.3 Avifauna

Als weitere planungsrelevante Gruppe von Organismen, zählt die Gesamtheit aller in der Region vorkommenden Vogelarten. Darunter zählen Brutvögel, Durchzügler und sogenannte Wintergäste. Direkte negative Auswirkungen von PV-FFA auf die Mortalitätsrate von Vögeln lassen sich oft nicht genau bestimmen. Dabei ist davon auszugehen, dass es sich um additive Umstände durch weitere natürliche und anthropogene Einflüsse handelt. Nach Taylor et.al. (2019) zeigen einzelne Untersuchungen zwar, dass horizontale PV-Flächen mit Gewässern und vertikale Flächen mit offenen Flugwegen verwechselt werden können, es gibt aber keine Hinweise auf eine dadurch bedingte erhöhte Kollisionsgefahr. Um das Risiko zu minimieren, sollte aber insbesondere an kritischen Standorten wie Zugrouten oder Nahrungshabitaten auf glatte und vertikal ausgerichtete Oberflächen verzichtet werden (Greif et.al 2017). Mit der Schaffung avifaunistisch attraktiver und standortgerechter Lebensräume können je nach Bewirtschaftung

von Flächen bestimmte Arten gefördert werden. Dazu zählt die Einbindung von Brutmöglichkeiten oder begünstigten Bedingungen für ein potenzielles Nahrungsangebot durch z.B. Insekten. Verschiedene integrierte Habitate als kleinräumige Nutzungen innerhalb einer Fläche können hier zielführend sein. Ähnliche Aussagen lassen sich zur Gruppe der Fledertiere (Fledermäuse und Flughunde) treffen. Diese werden hier aber in ihrer Komplexität ausgeklammert und durch Maßnahmen für die Avifauna grundlegend mit berücksichtigt.

3.4 Säugetiere

Unter dem Begriff der Säugetiere werden im Rahmen dieser Arbeit insbesondere größer erscheinende Wildtiere zusammengefasst, welche durch das Anlegen großflächiger PV-FFA mit Lebensraumverlusten konfrontiert sind. Dazu zählen zum Beispiel Rehwild, Rotwild oder Raubsäuger wie Füchse und Wölfe. Um Diebstähle zu vermeiden, werden PV-Anlagen in der Regel großräumig eingezäunt. Durch diese Landschaftsveränderungen und künstlich erschaffenen Barrieren findet gleichzeitig eine Lebensraumzersiedelung statt. Dies wiederum wirkt sich auf die Lebensraumqualität, Migrationsrouten und das Jagdverhalten der Tiere aus. Betrachtet man beispielsweise die Territorialität eines Fuchses, erstreckt sich das Jagdrevier über 10 bis 20 ha. Je nach Nahrungsangebot kann sich die Flächengröße darüber hinaus deutlich ausdehnen (Kaphegyi T. 2002). Durch die Schaffung von eingezäunten Solarparks können demnach nahezu ganze Reviere eingenommen werden oder eine gezwungene Reviererweiterung bzw. eine neue Reviersuche hervorgerufen werden. Mithilfe von Durchlässen in Zäunen oder natürliche, dem Menschen nicht überwindbare, Einfriedungen wie Feldhecken kann dem entgegengewirkt und gleichzeitig neue Habitate und Versteckmöglichkeiten geschaffen werden. Bisher gibt es kaum Forschungsergebnisse hierzu, weshalb sich vermehrt auf das Verhalten als Indiz für Populationsreaktionen konzentriert werden muss (Chock et.al. 2020).

3.5 Reptilien und Amphibien

Da sich einzelne ausgewertete Studien unter anderem auch mit den Organismengruppen der Reptilien und Amphibien auseinander setzten und diese ebenfalls planungsrelevant sein können, müssen diese kurz Erwähnung finden. In Deutschland leben insgesamt 21 Amphibien und 14 Reptilienarten.

Zu den Amphibien zählen z.B. Kröten, Frösche und Unken. Den Reptilien werden z.B. Eidechsen oder Salamander zugeordnet. Die Arten unterscheiden sich dahingehend, dass der Lebensraum von Amphibien eng mit dem Wasser verknüpft, wiederum der Lebensraum der Reptilien wasserunabhängig ist (NABU o.J.). Somit können keine Maßnahmen zur Artenförderung für beide Gruppen generalisiert werden. Dadurch, dass es sich jedoch in beiden Fällen um wechselwarme Tiere handelt, kann eine darauf ausgerichtete PV-FFA Anlage mit Sonnen- und Schattenplätzen einen vorteilhaften Lebensraum bieten. Die akute Bestandsgefährdung von mehr als zwei Dritteln der Reptilienarten und jeder zweiten Amphibienart in Deutschland, lässt in dieser Möglichkeit eine signifikante Chance zum Artenschutz erkennen (BfN Rote Listen Reptilien und Amphibien 2021).

4. Photovoltaik-Freiflächenanlagen

Als zentraler Baustein der Energiewende bieten Photovoltaik-Freiflächenanlagen den Vorteil einer kostengünstigen und schnellen Installation bezogen auf ein hohes Ausbauvolumen. Ein Kostenvergleich, in Abbildung 6 (S. 17), des Fraunhofer-Institut für solare Energiesysteme zeigt, dass PV-FFA die niedrigsten Stromgestehungskosten⁹ erzielen können (Fraunhofer ISE 2021). Die Ausrichtung der einzelnen Module bzw. die Nutzung von Nachführsystemen kann dank der Bauweise frei gewählt werden und insofern dem optimalen Sonnenstand angepasst werden. In topografischer Hinsicht bestehen kaum Einschränkungen. Lediglich nördlich exponierte Hangflächen sind aufgrund ihrer abgewandten Ausrichtung zur Sonne ungeeignet. Die Standortauswahl steht also eher unter naturschutzfachlichen und rechtlichen Kriterien sowie der Wirkung auf das Landschaftsbild. Dabei sind die Anlagen im Außenbereich seit Ende 2022 nur teilweise privilegiert (pv magazine 2023). Dies führt zur Notwendigkeit eines Bebauungsplans nach §35 Baugesetzbuch, was die Planung und Umsetzung aufwendig und teuer macht. Sie können mit Förderungen nach dem EEG betrieben und somit ökonomisch lukrativer werden. Je nach wirtschaftlicher Größenordnung kann ferner auch eine Selbstnutzung des Stroms ohne Förderung lohnenswert sein.

⁹ Notwendige Kosten zur Umwandlung einer Energieform in elektrischen Strom (z.B. in Euro je Kilowattstunde).

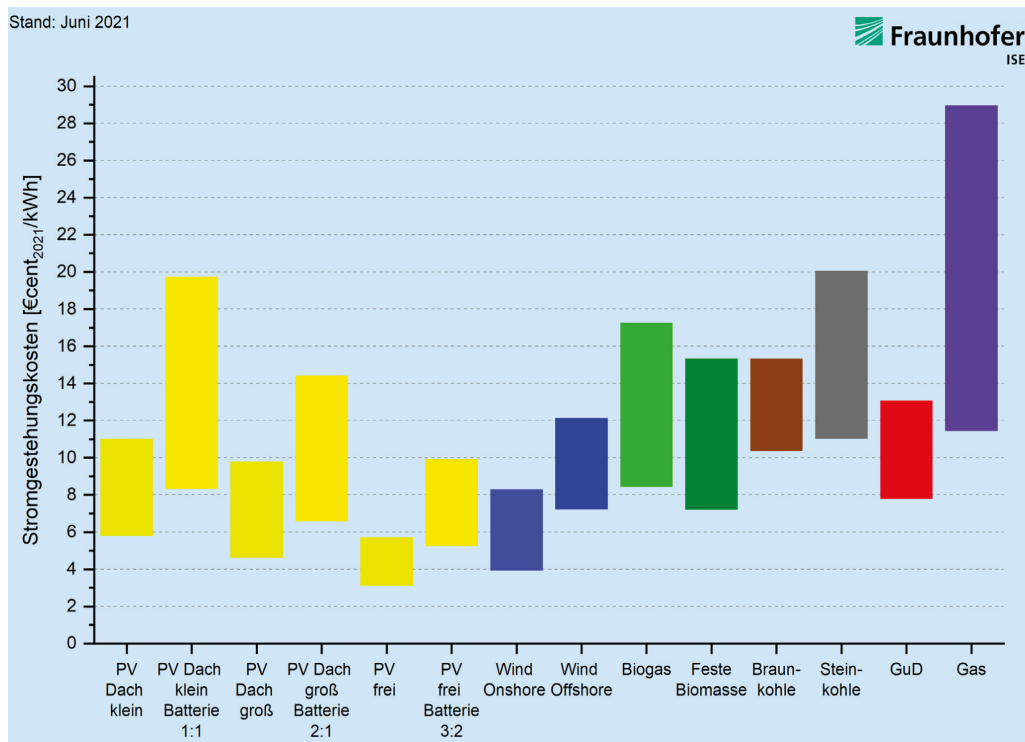


Abbildung 6: Vergleich der Stromgestehungskosten von erneuerbaren Energien und konventionellen Kraftwerken in Deutschland. Anlagenkosten sind mit einem minimalen und maximalen Wert je Technologie berücksichtigt.
(Quelle: Fraunhofer ISE 2021)

Besonders geeignet sind ehemalige landwirtschaftliche Flächen, welche als solche nicht mehr genutzt werden (können). Bei guter Planung tragen die Anlagen einen erheblichen Teil zur Extensivierung von, durch Monokulturen geprägte und zersiedelte, Agrarlandschaften bei und führen zu einer wertvollen Steigerung der Biodiversität. Eine Förderung der Bestäubervielfalt beispielsweise kann in diesem Rahmen gleichermaßen zu Ertragssteigerungen der umliegenden Felderwirtschaft führen.

4.1 Stand der Technik

Grundsätzlich gesehen, besteht eine PV-Anlage aus mehreren in Reihe oder parallel geschalteten PV-Modulen. Hinzu kommen ein oder mehrere Wechselrichter¹⁰, das Montagesystem und ein Netzanschluss (C.A.R.M.E.N. 2023). Die allgemeine Funktionsweise der Module, bestehend aus einer Vielzahl herkömmlicher Siliziumzellen, wurde bereits im *Kapitel 2.1 Funktionsweise*

¹⁰ Wandelt den erzeugten Strom der Anlage von Gleichspannung in Wechselspannung, um diesen anschließend zu Nutzen oder in das Netz einzuspeisen.

näher beschrieben. Die Abmessung der Module kann variieren. „Etabliert hat sich eine Modulgröße im Format 1,7 m auf 1 m [...]“ mit einer Leistung von 370 Wp¹¹ (ebd.). Die obere und sonnenzugewandte Seite der PV-Module besteht aus Glas. Somit wird das auftreffende Licht nicht reflektiert, sondern zu den Zellen hindurch gelassen. Insbesondere bezüglich möglicher Blendwirkungen ist dies ein wichtiger Faktor. Die Befestigung an der Unterkonstruktion erfolgt mittels eines Aluminium- oder Edelstahlrahmens. Eine spezielle Form von Modulen sind bifaziale oder auch zweiseitige Solarmodule. Diese tragen beidseitig Solarzellen und erreichen so eine höhere Effizienz von bis zu 25% (Janßen 2023). Für die Anwendung in vertikaler Ausrichtung, beispielsweise als Solarzaun, ist dieser Modultyp denkbar (Wesselak und Voswinckl 2016). Zur Einspeisung des gewonnenen und durch den Wechselrichter bereitgestellten Stroms ist eine Trafostation oder ein Transformator notwendig. PV-FFA haben das Potenzial, als temporäre, nicht versiegelte und reversible¹² Eingriffe in die Landschaft eingebunden zu werden. Die Aufstellung der Anlagen erfolgt über stabile und robuste Montagesysteme. Hier haben sich zwei Arten etabliert, welche von der Bodenbeschaffenheit weitestgehend unabhängig sind und in Einzelposten- und Zweiposten-Systeme unterschieden werden (siehe Abbildung 7).

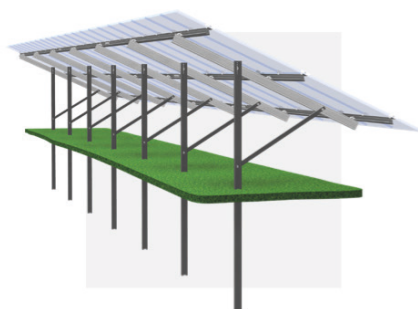
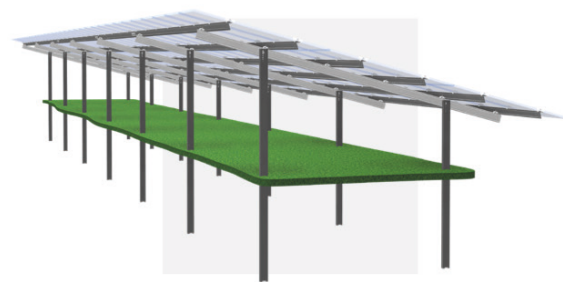
**EINZELPOSTENSYSTEM****ZWEIPOSTENSYSTEM**

Abbildung 7: Montagemöglichkeiten für Freiflächensysteme
(Quelle: SL Rack 2022)

Die Pfosten können dabei auf Punkt- oder Streifenfundamenten verankert werden. In den meisten Fällen werden sie jedoch bis zu zwei Meter in den Boden gerammt und bilden auf diese Weise die Basis für die Modulhalterungen. Durch

¹¹ Elektrische Leistung in Watt Peak.

¹² Umkehrbar.

diese Technik findet lediglich eine geringe Bodenversiegelung statt und die Pfosten können im Falle der Demontage rückstandsfrei und umweltschonend wieder aus der Erde gezogen werden (C.A.R.M.E.N. 2023). Die Ausrichtung der Module unterscheidet sich durch feste und nachgeführte Typen. Dabei sind die stationären Anlagen in ihrer Ausrichtung endgültig bestimmt, wohingegen die Module der nachgeführten Systeme dem Sonnenverlauf mittels Getriebemotor folgen bzw. angepasst werden und höhere Erträge erzielen können. Nach Wesselak und Voswinckel (2016) handelt es sich hier um bis zu 30%. Nachteile stellen der erhöhte Platzbedarf sowie höhere Kosten und Wartungsaufwände dar. Die Modulreihen unterliegen je nach Ausrichtung einer gegenseitigen Verschattung, was den möglichen Ertrag mindern kann (solarenergie.de 2023).

4.2 Flächenverbrauch

„Die Landnutzung für erneuerbare Energien führt zunehmend zu Flächenkonkurrenz zwischen Kultur-, Landschafts- und Naturräumen.“ (Franz 2023). Die Effizienz und der Ertrag einer PV-FFA sind dabei stark abhängig von der genutzten Fläche und Anlagengröße. Wie bereits im *Kapitel 2.1 Funktionsweise* beschrieben, erzeugen PV-Anlagen Strom bezogen auf ihre Fläche. Nach dem Zentralen Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk, kurz C.A.R.M.E.N. (2023) liegt der Flächenbedarf bei 1 ha pro Megawatt Peak (MWp). Die tatsächlich bebaute Fläche beschränkt sich durch die Ständerbauweise auf ein Minimum. Aus diesem Grund muss hier vielmehr die überbaute Fläche, also der Bereich welcher unter der absoluten Modulfläche liegt, in Betracht gezogen werden. Durch die voranschreitende Entwicklung der letzten Jahre ist die Technologie von PV-Modulen immer effizienter geworden. Eine Studie der Technischen Universität in Wien beweist diesbezüglich, dass der benötigte Landverbrauch pro installierter Leistung in Kilowatt (kW) je Quadratmeter (m²) zwischen 2006 und 2022 um 61% zurück gegangen ist (siehe Abbildung 8, S.20) (Franz 2023). Somit ergibt sich ein derzeitiger Flächenbedarf von ca. 1 - 1,5ha pro MW produzierter Leistung mit positiver Prognose für die kommenden Jahre, welche sich durch die hinzugezogene Studie widerspiegelt. Unter der Berücksichtigung der neusten Effizienzstandards und einer engeren Einfriedung, kann eine noch bessere Flächenausnutzung für PV-FFA forciert

und der Flächendruck bezogen auf die produzierte Leistung deutlich gemindert werden.

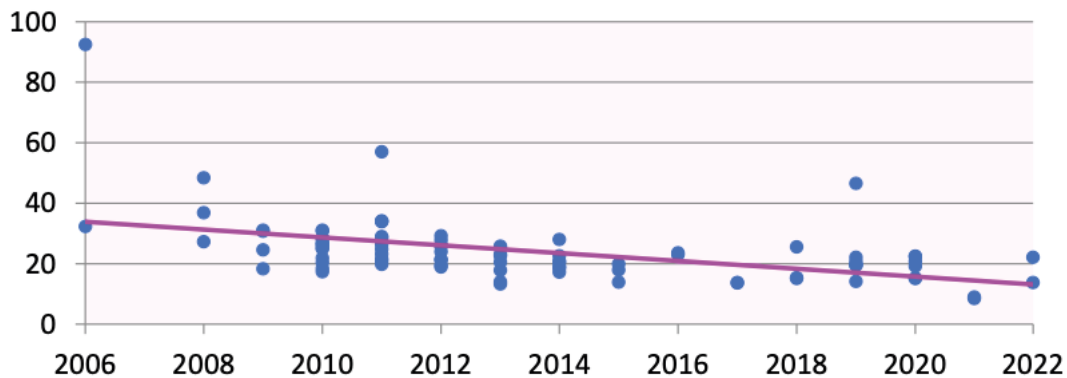


Abbildung 8: Entwicklung des Landverbrauchs pro installierter Leistung in m²/kW bei Betrachtung von 91 PV-Freiflächenanlagen verschiedener europäischer Regionen (Quelle: Franz 2023)

4.3 Rechtliche Grundlagen

Die Errichtung von großflächig angelegten PV-Anlagen ist an eine Vielzahl rechtlicher Anforderungen und Vorgaben geknüpft. Die Regelungen sind in Deutschland von Bundesland zu Bundesland bis zu einem gewissen Maß heterogen. Länderübergreifend sowieso, weswegen in der vorliegenden Arbeit die grundlegende Situation in Deutschland bzw. Thüringen vertieft werden soll. Als wichtigste Gesetzesnovelle im Bereich der Erneuerbaren Energien zählt das EEG 2023, was erstmals auf das konsequente Erreichen der Ziele des Pariser Klimaschutzabkommens ausgerichtet ist (Die Bundesregierung 2023). Hier werden unter anderem gesetzliche Vorränge, Ausbaupfade oder Vergütungen für Wind- und Solarenergie geregelt, welche insbesondere in beschleunigten Verfahren umgesetzt werden sollen. „Seit 2004 bestimmt das EEG förderrechtlich die standörtlichen Voraussetzungen für PV-Freiflächen Anlagen.“ (Dr. Günnewig et.al. 2022). Da PV-FFA nach §35 Abs. 1 BauGB nicht zu den privilegierten Vorhaben¹³ und gleichzeitig als bauliche Anlagen gelten, ist im Regelfall neben einer Baugenehmigung die Änderung des Flächennutzungsplanes (FNP) bzw. Aufstellung eines (vorhabenbezogenen) Bebauungsplanes (B-Plan) seitens der betroffenen Kommune notwendig. Ausgenommen sind Anlagen innerhalb eines

¹³ Bauvorhaben auf Außenflächen für welche kein qualifizierter Bebauungsplan angefertigt werden muss.

500m Korridors entlang zweigleisigen Bahnstrecken oder Autobahnen (EEG 2023). Bauliche Anlagen sind im Sinne des §29 Abs. 1 Thüringer Bauordnung (ThürBO) *„mit dem Erdboden verbundene, aus Bauprodukten hergestellte Anlagen. Eine Verbindung mit dem Boden besteht auch dann, wenn die Anlage durch eigene Schwere auf dem Boden ruht oder auf ortsfesten Bahnen begrenzt beweglich ist oder wenn die Anlage nach ihrem Verwendungszweck dazu bestimmt ist, überwiegend ortsfest benutzt zu werden.“* Aus naturschutzfachlicher Perspektive werden festgesetzte Restriktionsflächen nach §23 und §24 Bundesnaturschutzgesetz (BNatschG), aufgrund ihrer besonderer Schutzfunktion ausgeschlossen. Hinzu kommen landschaftliche Vorbehaltsgebiete, Natura2000-Gebiete oder geschützte Landschaftsbestandteile nach §29 BNatschG. Ausnahmen regelt §34 Abs. 3 BNatschG, welcher zwingende Gründe des öffentlichen Interesses und keine zumutbare Alternative voraussetzt. Betrachtet werden dabei ebenso die Schutzgüter Boden, Wasser und Denkmalschutz. Diesbezüglich schreibt die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung (§§ 13 ff. BNatschG) ohnehin eine Unterlassung von vermeidbaren Beeinträchtigungen vor, was bei der Aufstellung eines B-Planes einen wichtigen Faktor einnehmen kann. Der Regionalplan Nordthüringen aus dem Jahr 2018 sieht vor, dass *„[m]it der Konzentration von raumbedeutsamen Photovoltaikanlagen auf Brach- und Konversionsflächen sowie Deponiekörpern, Schlamm-, Asche- und Rückstandshalden des Kalibergbaues [...] eine Konkurrenz mit freiraumrelevanten Flächennutzungen/-funktionen vermieden.[...]“* wird. Dadurch wird bereits eine Flächenzuweisung impliziert. Die Abstände diverser Restriktionszonen¹⁴ werden durch die Bundesländer im §6 Abs 1 Landesbauordnung (LBO) eigens definiert und durch §22 Baunutzungsverordnung (BauNVO) ergänzt. Da es bei PV-FFA zu relevanten Beeinträchtigungen des Bodens oder bestimmter Arten kommen kann, greift die Eingriffs-Ausgleichsregelung nach §13 und §15 Vermeidungsgebot. Sind die auftretenden Beeinträchtigungen erheblich und nicht zu verhindern, gilt die Kompensationspflicht oder weiterführend die Abwägung. Als Beispiel werden mögliche Kompensationsmaßnahmen in nachfolgender Tabelle 1 (S. 22) der wissenschaftlichen Dienste des deutschen Bundestages

¹⁴ Gesetzlich vorgeschriebenen und sicherheitsrelevante Abstände zu z.B. Gewässern oder Bundesstraßen.

vorgeschlagen. Weitere Regelungen wie die DIN VDE 0100-530 „Auswahl und Errichtung elektrischer Betriebsmittel“ oder Gefahrstoffverordnungen können je Fallbeispiel hinzukommen.

Tabelle 1: Mögliche Kompensationsmaßnahmen bzgl. Beeinträchtigungen durch den Bau einer PV-FFA
(Quelle: Deutscher Bundestag 2019)

Schutzgut	Mögliche Beeinträchtigungen (Auswahl)	Mögliche Kompensationsmaßnahmen für nicht vermeidbare Beeinträchtigungen (Auswahl)
	Zerschneidung/Unterbrechung von Lebensräumen	• Neuanlage von vernetzenden Biotopen • Behebung bzw. Reduzierung bereits bestehender vom Vorhaben unabhängiger Zerschneidungseffekte
Boden	Verlust von Boden	• Entsiegelung • Extensivierung der landwirtschaftlichen Nutzung, Rücknahme von Düngung und Pesticideinsatz • Dauerhafte Vegetationsbedeckung von Boden und damit Schutz vor Bodenerosion
	Veränderung der Bodenstruktur / des Bodengefüges	• Entsiegelung • Vitalisierung von Böden z. B. durch Bodenlockerung
Landschaft / Landschaftsbild	Veränderung von Landschaftsbildräumen durch technische Überprägung, Verlust von Vegetation und anderen Landschaftselementen	• Landschaftsgerechte Einbindung durch Anlage naturraumtypischer Landschaftselemente • Sichtverschattung beeinträchtigender Teile des Vorhabens durch direkte Eingrünung mit Gehölzen, Pflanzung optisch wirksamer Großgehölze etc.

4.4 Vergütungen nach EEG 2023

Die aktuelle Fassung des EEG bringt im Vergleich zur Fassung aus 2021 wichtige Neuerungen und Erweiterungen der Förderkulisse mit sich. Mit dem Osterpaket zum Ausbau erneuerbarer Energien wurden vom Deutschen Bundestag die Vergütungssätze und Einspeisebedingungen angepasst. Die Einspeisevergütung ist eine Zuwendung von Geldmitteln für Betreiber*innen einer erneuerbaren Energiequelle pro Kilowattstunde erzeugten Strom und gilt bei Anlagen bis zu einer installierten Leistung von 100 kWp. Der Betrag ist dabei vom Energieträger und der Anlagengröße abhängig und wird vom Zeitpunkt der Inbetriebnahme 20 Jahre unverändert vom Netzbetreiber ausgezahlt (EIGENSONNE 2023). Dabei wird in Volleinspeisung und Teileinspeisung (Überschusseinspeisung) klassifiziert, was das Leistungssegment zusätzlich unterscheidet. Für Stromkapazitäten ab einer Größe von 100 kWp ist die Direktvermarktung als die direkte Übertragung an Käufer*innen verpflichtend. Bei Anlagen bis zu 1 MWp wird von einer Marktprämie gesprochen. Auch hier wird vom „[...] EEG die verpflichtende Direktvermarktung des eingespeisten Solarstroms [...]“ vorgesehen (C.A.R.M.E.N 2022). Über eine Strombörse

verkauft, werden den Anlagenbetreiber*innen die Erlöse der Direktvermarktung im Rahmen des Marktprämienmodells ausbezahlt. Die Marktprämie errechnet sich aus der Differenz des nach §48 EEG gesetzlich anzulegenden Wertes von derzeit 7 Cent pro kWh und dem Monatsmarktwert für Solarstrom (EEG 2023). Ab einer Anlagengröße von über 1 MWp installierter Leistung besteht die Ausschreibungspflicht. Die Ausschreibung wird über die Bundesnetzagentur gesteuert und bestimmt den anzulegenden Wert nach erfolgreichem Gebotswert. Die Auszahlung erfolgt dann nach dem selben Prinzip wie bei dem der Marktprämie. Durch die Bundesnetzagentur (2023) festgelegt, liegt der Höchstwert nach §85a Abs. 1 und 2 für das Jahr 2023 bei 7,37 Cent pro kWh. Der EEG geförderte Ausbau von PV stellt aber nur noch einen Teil des Zubaus dar, was unter anderem zu einer höheren Flexibilität bei der Standortausweisung führt (Stiftung Umweltenergierecht 2022).

4.5 Power Purchase Agreement

Bei Power Purchase Agreements (PPA) handelt es sich um langfristige Stromliefer- bzw. Abnahmeverträge von Erneuerbaren Energien, welche einen wichtigen Beitrag zur Energiewende beitragen können. Im Vergleich zu anderen europäischen Ländern spielt die Methode in Deutschland marktwirtschaftlich bisher noch eine eher untergeordnete Rolle (Fischer et.al 2019). In Bezug auf nach 20 Jahren auslaufende EEG-Förderungen können sie aber eine wichtige Rolle zur Weiterfinanzierung und Vermarktungsoptionen erneuerbaren Energieparks wie PV-FFA einnehmen. Dabei geht es um langfristige Vereinbarungen eines Stromerzeugers und eines Abnehmers, welcher Strom dauerhaft gesichert, direkt und zu einem vereinbarten Preisniveau beziehen kann. Viele Großindustrien streben eine direkte Versorgung ohne Zwischenversorger an, um die eigenen Herstellungsprozesse zur CO₂-Neutralität zu lenken. Die Aktualität dessen wird durch die nachfolgende Abbildung 9 (S. 24) deutlich. Diese zeigt eine aus den EEG-Vergütungen fallende Leistung von ca. 51,6 GW bis zum Jahr 2030. Die ersten Jahre sind dabei zunächst von Windanlagen geprägt. An zweiter Stelle wird das Folgen von immer mehr Anlagen zur Gewinnung von Solarstrom prognostiziert. Biomasseanlagen und sonstige Energiequellen fallen in diesem Rahmen nicht mit erheblichem Ausmaß ins Gewicht, müssen aber dennoch

genannt werden. Hier macht sich der stärker geförderte Ausbau von Wind- und PV-Anlagen bemerkbar und benötigt, aufgrund des weiter steigenden Strombedarfs, entsprechende Folge­lösungen.

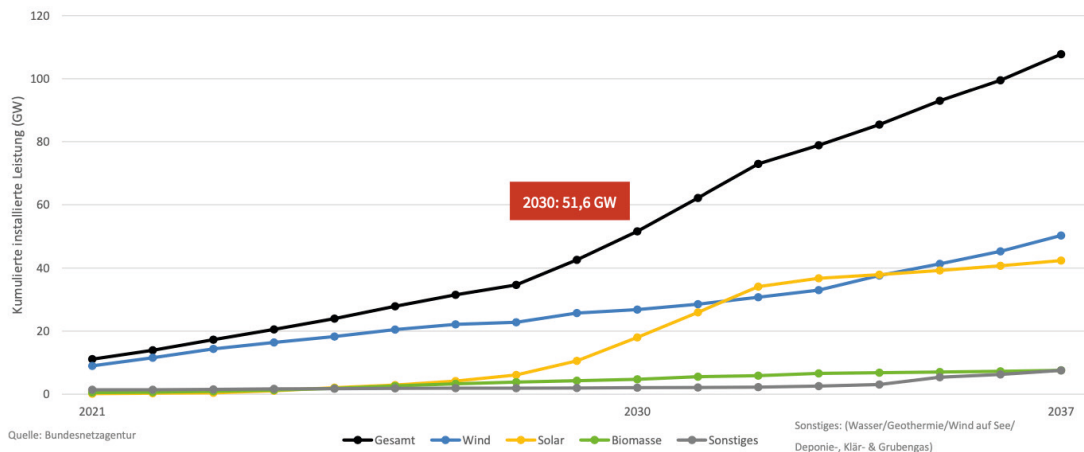


Abbildung 9: Aus der EEG-Vergütung fallende Erneuerbare Energienanlagen mit einer gesamten installierten Leistung von 51,6 GW bis zum Jahr 2030
(Quelle: Fischer et.al. 2019)

5. Methodisches Vorgehen der Literaturanalyse

5.1 Literaturauswahl

Um die Auswirkungen von Solarparks auf die biologische Vielfalt zu verstehen und bereits gewonnene Erkenntnisse zusammenzutragen, dient eine umfassende dreimonatige Studie und Auswertung von wissenschaftlicher Literatur als Grundlage. Die Auswahl der Literatur erfolgte in mehreren Teilschritten und unterlag den Kriterien bezüglich ihrer thematischen Relevanz und zur Beantwortung der Forschungsfragen dieser Arbeit. Dabei handelt es sich um die im Folgenden beschriebenen Fachtermini zur Ausführung der Suchanfragen. Durch das umfassende Interessenfeld wurde sich nicht auf ein einzelnes Land bezogen, sondern eine Synthese aus globalen Disziplinen gebildet, um so den Stand der internationalen Forschung zu vermitteln. Diesbezüglich wurden wissenschaftliche Texte aus 8 Ländern in deutscher und englischer Sprache ausgewertet (siehe Abbildung 10, S.25). Die Varianz der Länder bezieht dementsprechend unterschiedliche Breitengrade und Klimazonen mit ein. Dies führt zwar zur Betrachtung mehrerer Standortbedingungen und Artzusammensetzungen, bringt aber wiederum eine hohe Heterogenität innerhalb der Analyse mit sich. Bei der Auswahl der wissenschaftlichen Referenzen

wurde das Hauptaugenmerk auf die alleinige Betrachtung von Freiflächen-Photovoltaik gelegt. Der Ausschluss anderer Nutzungsformen erklärt sich durch die eingangs erläuterte Zielstellung der vorliegenden Arbeit, welche eindeutig die Biodiversitätsauswirkungen und Förderungsmöglichkeiten in PV-FFA hinterfragt. Somit werden Anlagentypen wie Agro- oder Floating-PV nicht betrachtet. Für die Recherche dienten bereits aufgestellte Literaturlisten, welche durch vorherige Forschungen eruiert und durch Prof. Dr. Kerstin Wydra zur Verfügung gestellt wurden. Die Literatur konnte im Anschluss nach den Kerninhalten Biodiversität und PV-FFA zusammengestellt werden. Grundlage hierfür bietet unter anderem eine Literaturstudie der EnergieSchweiz aus dem Jahr 2021 zum Thema „Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt“ (Schlegel et.al. 2021), welche an dieser Stelle Erwähnung finden soll. Die Rechercheerweiterung über Suchmaschinen und wissenschaftliche Datenbanken soll eine Vollständigkeit der ausgewählten Quellen gewährleisten.

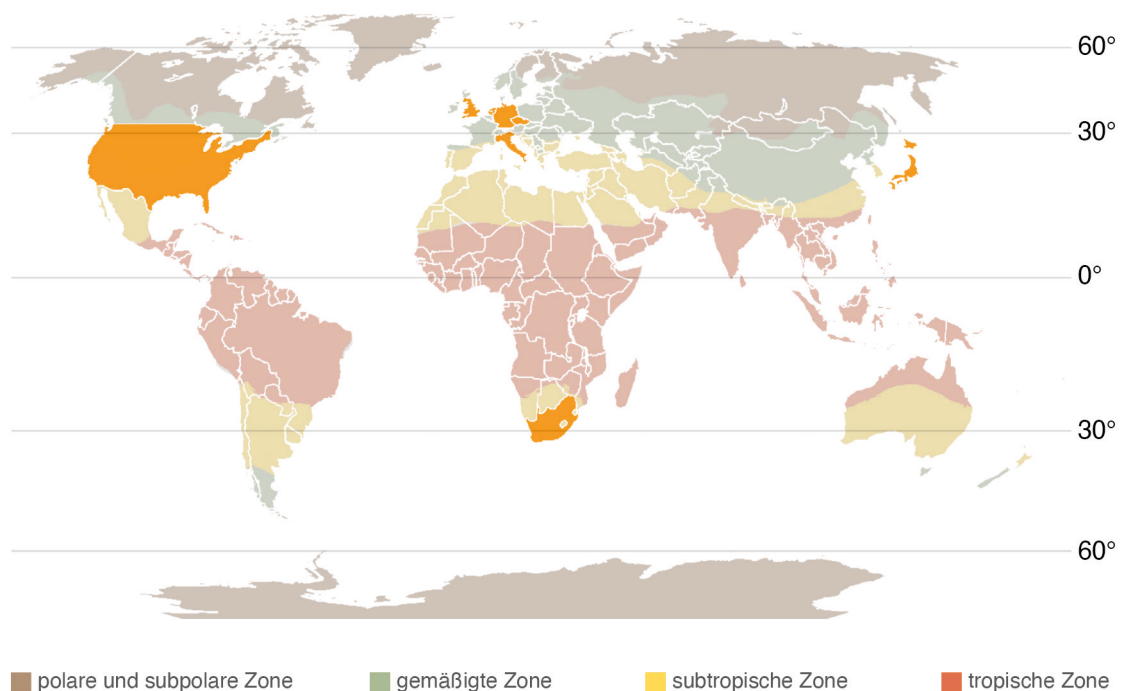


Abbildung 10: Länderübersicht aus welchen die betrachteten Forschungsergebnisse stammen (in Orange eingefärbt). Hierbei sind mehrere Breitengrade und Klimazonen betroffen, was zu unterschiedlichen Standortbedingungen und Artzusammensetzungen der untersuchten Anlagen führt.

(Quelle: eigene Darstellung)

Konsultiert wurden in diesem Rahmen folgende Suchdienste im Internet:

<i>Ecosia</i>	https://www.ecosia.org/?c=de
<i>Google Scholar</i>	https://scholar.google.com
<i>ScienceDirect (Elsevier)</i>	https://www.sciencedirect.com

Als Basis der Suchanfragen dienten unter anderem folgende alleinstehende oder in Kombination gesetzte Begrifflichkeiten und Schlagwörter:

<i>Avifauna</i>	<i>Bestäuber</i>
<i>Biodiversität</i>	<i>biologische Vielfalt</i>
<i>Freiflächen-Photovoltaik</i>	<i>Insekten</i>
<i>Photovoltaik</i>	<i>Solaranlage</i>
<i>Vegetation</i>	<i>Wildtiere</i>

Die genannten Fachtermini wurden analog in englischer Übersetzung auf den selben Plattformen abgeprüft. Um das quantitative Ausmaß im Rahmen der vorliegenden Arbeit zumutbar zu halten, wurde im nächsten Schritt durch die Sichtung der jeweiligen Abstracts eine Auswahl nach Themenrelevanz getroffen. Ziel war es, möglichst aussagekräftige und einem Peer-Review¹⁵ unterzogene Ergebnisse in Bezug auf Auswirkungen von PV-FFA auf die direkte Umwelt herauszufiltern. Dabei wurde insbesondere auf die Kernfrage und die übermittelten Ergebnisse der wissenschaftlichen Arbeiten geachtet, um eine weitgehende Übereinstimmung mit der hier behandelten Fragestellung, zu erzielen. Durch dieses Verfahren beschränkt sich die Auswahl der analysierten Literatur auf *31 referierte wissenschaftliche Paper, 5 Studien und 7 Projektberichte*, welche als sogenannte graue Literatur¹⁶ gewertet werden. Der Auswertungszeitraum erstreckt sich vom Erscheinungsjahr 2013 bis 2023. Genauere Aussagen hierzu folgen im nächsten Kapitel. Zur Erstellung

¹⁵ Durch Experten des Fachgebiets begutachtet und zur Veröffentlichung freigegebene Texte (Schultz 2019).

¹⁶ Schriftliche Arbeiten, welche nicht von einem Verlag publiziert wurden (z.B. Preprints akademischer Arbeiten, interne Behördenberichte, nicht veröffentlichte Graduierungsarbeiten usw.).

einer Datenmatrix wurde die Literatur sowie deren wichtigste Informationen und Ergebnisse in einer Excel-Liste zusammengefasst (siehe Abbildung 11).

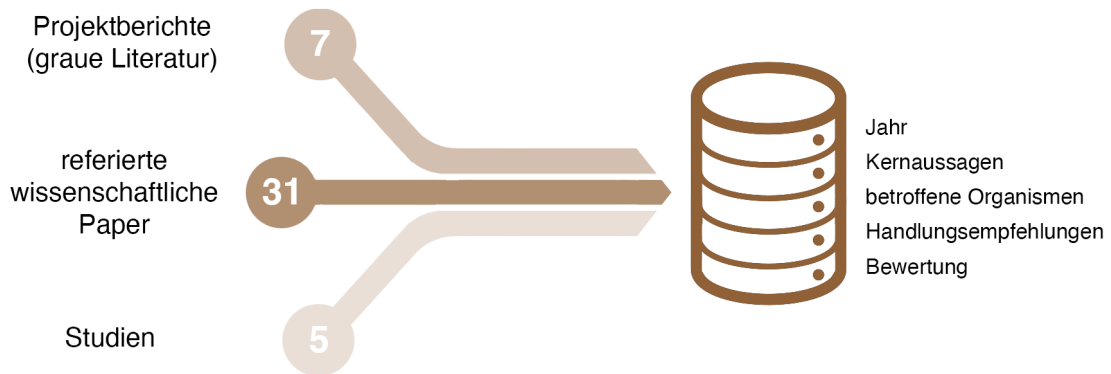


Abbildung 11: Anzahl und Aufteilung der relevanten wissenschaftlichen Literatur, welche in einheitlicher Datenmatrix zusammengeführt wurde
(Quelle: eigene Abbildung)

Die gesamtheitliche Auflistung der Literatur ist im Anhang auf Seite xv zu finden.

5.2 Erstellung einer Datenmatrix

5.2.1 Allgemein

Zur Analyse und Auswertung der gefilterten Literatur muss diese zunächst in eine einheitliche Datenmatrix bzw. einen einheitlichen Datensatz übertragen werden. Wie der Abbildung 11 zu entnehmen, gliedert sich diese neben dem Titel, der Literaturkategorie und der Quelle in die folgenden auswertungsrelevanten Ordnungspunkte bzw. Untersuchungskategorien:

<i>Jahr:</i>	<i>Wann wurde der Artikel veröffentlicht?</i>
<i>Kernaussage:</i>	<i>Welcher Kerninhalt wird untersucht?</i>
<i>Handlungsempfehlungen:</i>	<i>Werden bereits Handlungsempfehlungen angesprochen und wenn ja welche?</i>
<i>Organismen:</i>	<i>Welche Organismengruppen werden thematisiert?</i>

5.2.2 Bewertungssystem

Für die statistische Auswertung wurde ein Bewertungssystem entwickelt, welches die Ergebnisse der Literatur nach ihren Kernaussagen in positive und negative Auswirkungen auf untersuchte Parameter der Biodiversität

einstufte. Hierfür dient als Erhebungsart ein einfaches Codierschema, um die nominale Einstufung von biodiversitätsfördernd und biodiversitätsschadend numerisch zuzuordnen. Für Ergebnisse und Aussagen, welche weder positive noch negative Tendenzen einnehmen, wird die Bewertungsstufe 0 (neutral) gewählt. Durch die Ergebnisse einer Studie hervorgehende äußerst gute Auswirkungen auf die Biodiversität erhalten die Stufe 2. Hierbei sind signifikante Verbesserungen zum Urzustand einer Fläche oder eines Standortes zu erkennen. Der numerische Antagonist wird durch die Bewertungsstufe -2 gebildet, welche bei beträchtlichen Schädigungen des Ökosystems durch eine PV-FFA Verwendung findet. Leichte Verbesserungen bzw. leichte Verschlechterungen erhielten die Bewertung 1 oder -1 (siehe Abbildung 12).

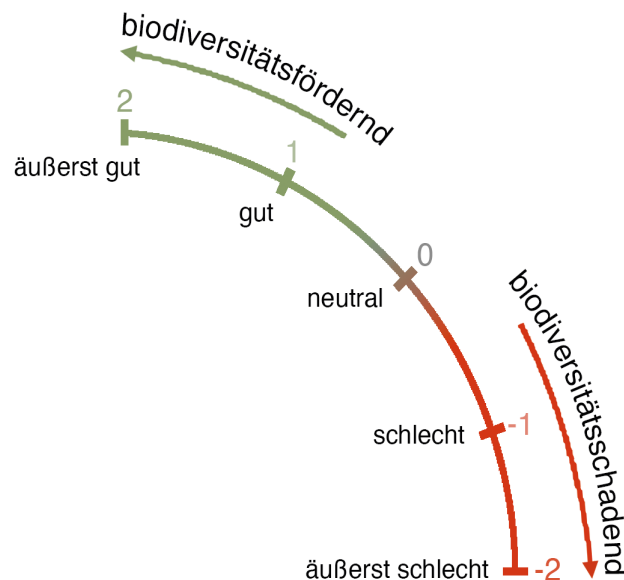


Abbildung 12: 5-stufige Codierungsskala zur Bewertung der analysierten Literatur und derer Ergebnisse
(Quelle: eigene Abbildung)

Als Beispiel zur ausgewählten Bewertungsstufe sollen die zwei folgenden Quellen dienen, anhand derer das Verfahren näher erläutert wird. In dem auf Bestäuber ausgerichteten wissenschaftlichen Paper „*Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem*“ (Graham et.al 2021) wird die Auswirkung von Solaranlagen auf die Pflanzenzusammensetzung, den Blütezeitpunkt und das Futtersuchverhalten in einer Agrarlandschaft untersucht. Dabei wurden

die vollschattigen und halbverschatteten Bereiche unter den Solarmodulen sowie die vollsonnigen Bereiche außerhalb untersucht. Die Ergebnisse liefern eine eindeutige Zunahme der Blütenfülle in Halbschattenparzellen (4%) gegenüber vollsonniger oder vollschattiger Bereiche. Dazu verzögerte sich der Blütezeitpunkt in den Halbschattenbereichen, was für die Bestäuber in der Spätsaison von Vorteil sein kann und einen zusätzlichen positiven Effekt mit sich bringt. Die Bestäuberhäufigkeit in vollsonnigen und halbschattigen Bereichen war durchschnittlich 3% pro 100 m² höher als in vollschattigen Bereichen. Nicht minder lässt sich bei der Anzahl von Bestäubervielfalt in vollschattigen Bereichen ein geringerer Deckungsgrad verzeichnen. Nichts desto trotz wurden in dem Paper keinerlei negative Auswirkungen im Rahmen der durchgeführten Studie festgestellt. Aus diesem Grund und der Tatsache geschuldet, dass die Ökosystemdienstleistung von Bestäubern als eine der wichtigsten und grundlegendsten anzusehen ist, trifft hier die Bewertungsstufe 2, also eine *äußerst gute* Auswirkung auf die Biodiversität, zu. Ein Beispiel für biodiversitätsschadende Ergebnisse und der damit verbundenen Einordnung im Minus-Bereich der Bewertungsskala liefert das Paper *„Assessing the impacts of a utility-scale photovoltaic solar energy facility on birds in the Northern Cape, South Africa“* (Visser et.al. 2018). Hier wurde der Einfluss von einer der größten PV-Anlagen in Südafrika auf Vogelmenschen untersucht. Dabei wird ein prinzipielles Kollisionsrisiko, was zu Sterblichkeiten führen kann, deklariert. Die Anlage wies außerdem eine geringere Anzahl und Artenvielfalt der Avifauna (38 Arten) im Vergleich zur Grenzzone (50 Arten) und dem angrenzenden nicht transformierten Land (47 Arten) auf. Da durch eine abschließende Extrapolation von 4,5 Todesfällen pro MW ausgegangen wird, erhielt diese Quelle die Bewertungsstufe -1. Das zeigt, dass es negative Auswirkungen der Anlage auf die Avifauna gibt. Diese sind jedoch radikal einschneidend, sodass eine Bewertung im Bereich -2 unangemessen erscheint.

5.2.3 Effektstärke

Um ein anschließendes Urteil über die Aussagekraft aller analysierten Arbeiten zu implementieren, wurde das Bewertungssystem um eine Effektstärke erweitert. Diese dient als Faktor für die vorher verteilten Grundsatzbewertungen

und gliedert sich, wie in Abbildung 13 dargestellt, auf einer Skala von 1 (kleiner Effekt), über 3 (mittelgradiger Effekt) bis 5 (großer Effekt).

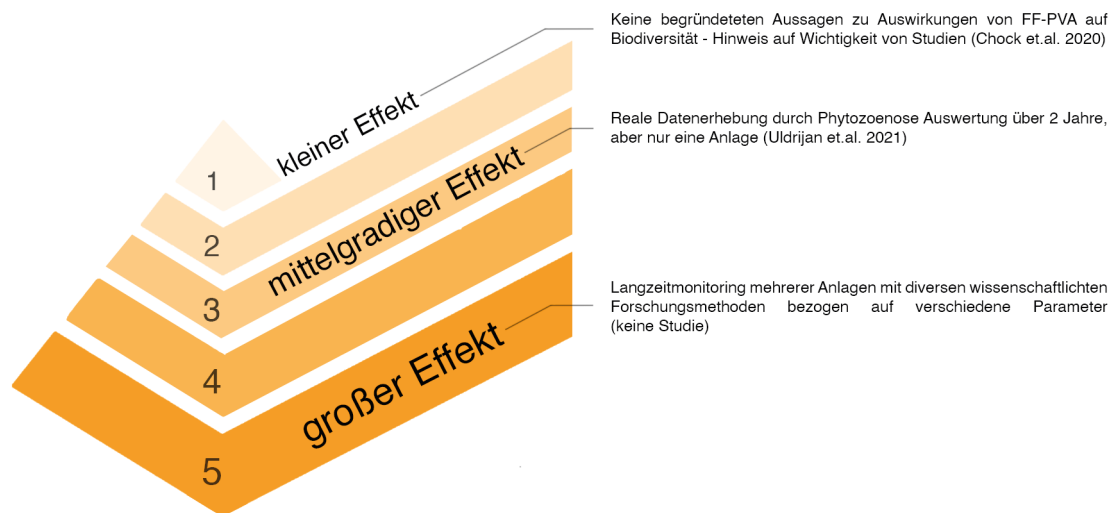


Abbildung 13: Einteilung der Effektstärken als Bewertungsfaktor
(Quelle: eigene Abbildung)

Durch die Erweiterung soll der Heterogenität der empirischen Forschungseffekte ein Indikator für die Bedeutsamkeit zugeordnet werden. Je nach Datenlage und Forschungsverfahren kommt eine andere Effektstärke zum Tragen. Insofern wird die Wichtigkeit der betrachteten Literatur im Rahmen der statistischen Auswertung deutlich. Durch die Faktorreichweite von 1 bis 5, multipliziert mit der jeweiligen Zuordnung der Codierungsskala, kann im gesamtheitlichen Bewertungsmaßstab eine maximale bzw. minimale Wertung von 10 und -10 erreicht werden. Hintergrund dessen ist eine nicht mögliche Gleichsetzung der Ergebnisse und Methoden analysierter und ausgewerteter Fachliteratur. Ferner soll die Zuordnung der Effektstärken anhand von 2 Beispielen verständlich gemacht werden. Das wissenschaftliche Paper „*Evaluating potential effects of solar power facilities on wildlife from an animal behavior perspective*“ (Chock et.al. 2020) liefert beispielsweise keine empirischen Forschungsergebnisse zur Auswirkung von PV-Anlagen auf das dort behandelte Themengebiet Fauna. Die Kernaussagen spiegeln sich eher in der Relevanz des Forschungsbedarfs und der Untersuchung von Wechselwirkungen wieder. Durch das Hervorheben von Forschungsthemen, wie Verhaltensweisen von Wildtieren und das Aufmerksam machen für die Zusammenarbeit von Industrie, Forschung

und Verwaltungsbehörden, leistet das Paper einen wichtigen Beitrag für die Problematik. In Bezug auf die Fragestellung der vorliegenden Arbeit muss aber ein *kleiner Effekt* mit dem Faktor 1 zugeordnet werden, da hier kaum Folgewirkungen einer PV-FFA untersucht wurden. Im Vergleich dessen stehen die Ergebnisse des Papers „*Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants*“ (Uldrian et.al. 2021). Hier wurde eine Effektstärke mittleren Grades gewählt, da es sich um eine reale Datenerhebung durch phytozönose¹⁷ Auswertungen handelt, welche über 2 Jahre stattfand. Da es sich jedoch nur um eine Anlage und einen kurzweiligen bis mittleren Betrachtungszeitraum handelt, ist eine höhere Effektkategorisierung nicht gerechtfertigt. Den größten Effektfaktor würde also eine wissenschaftliche Arbeit erhalten, welche durch empirische Datenerhebungen im Rahmen eines Langzeitmonitorings für verschiedene Anlagen und Untersuchungsparameter konkrete Aussagen zu positiven und / oder negativen Auswirkungen auf einzelne Organismengruppen trifft. Der Auswertung vorweg genommen, trifft dies auf keine der betrachteten Fachliteratur zu, da es sich hier um den absoluten Idealfall, bezogen auf die Ergebniserwartung im Rahmen der vorliegenden Arbeit, handeln würde. Außerdem kann die Liste mit weiterer signifikanter Forschungsliteratur ausgedehnt werden, wodurch zukünftige Ergebnisse durch ihre fortschreitenden Forschungsmethodiken höhere Bedeutsamkeiten als bisherige Effektstärken erlangen können. Die Zuordnung der Bewertungsstufen und Effektstärken erfolgte anhand logischer Parameter und Themenverständnis, jedoch nicht auf Grundlage kompakter mathematischer oder statistischer Berechnungsmethoden.

5.3 Auswertung der Ergebnisse

Die Auswertung der internationalen Forschungsergebnisse erfolgt gestaffelt in einzelnen Unterkapiteln mit Verknüpfung zu der übergeordneten Fragestellung. Dies dient der Übersichtlichkeit und soll die Komplexität der auswertungsrelevanten Parameter vereinfachen. Grundsätzlich ist die Betrachtungsweise des Forschungsstandes aber gesamtheitlich und ineinandergreifend zu bewerten.

¹⁷ Pflanzengemeinschaftliche Untersuchungen.

5.3.1 Jahrestrend

Der allgemeine und in den letzten Jahren steigende Stellenwert der vorliegenden Thematik wird durch die folgende Abbildung 14 verdeutlicht. Hierbei wird ein bezeichnender positiver Trend, im Hinblick auf die Anzahl veröffentlichter Literatur im betrachteten Zeitraum, deutlich. So fließen drei Arbeiten aus dem Jahr 2013 in die Meta-Analyse ein. Über eine Steigerung von fünf wissenschaftlichen Texten in den Jahren 2016 und 2018 wird im Jahr 2020 ein Peak mit 13 Abhandlungen erreicht. Obwohl sich die Anzahl ab diesem Zeitpunkt wieder senkt, deutet die dargestellte lineare Regression, als Punktlinie, auf eine positive Vorhersage hin. Die niedrigeren Werte ab dem Jahr 2021 können der Notwendig von neuen Langzeitmonitorings geschuldet sein. So wurde über die Jahre 2018 bis 2021 ein großes und breites Wissensspektrum publiziert, welches erst einmal eruiert werden und Anwendung finden muss.

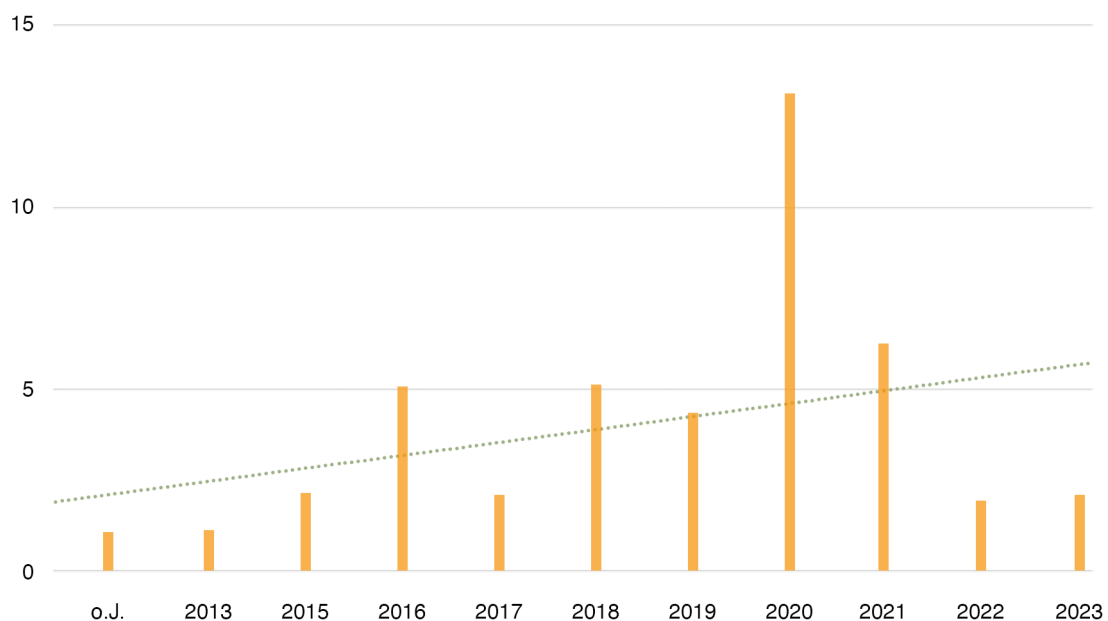


Abbildung 14: Die Regressionsgerade. Das Säulendiagramm zeigt die Anzahl ausgewerteter Fachliteratur und deren Erscheinungsjahr für die repräsentative Auswertung der Jahrestrends. (Quelle: eigene Abbildung)

Vielversprechende Forschungs- und Monitoringmethoden aus den vorangegangenen Arbeiten können in neu angesetzte Projekte einbezogen werden, welche durch die benötigte Langfristigkeit erst in den kommenden Jahren zu Ergebnissen führen. Als Beispiel werden an dieser Stelle die wissenschaftlichen Paper „*Extremophilic microbial communities on photovoltaic*

panel surfaces: a two-year study“ (Tanner et.al. 2020) und *„Land Conversion for Solar Facilities and Urban Sprawl in Southwest Deserts Causes Different Amounts of Habitat Loss for Ashmeadiella Bee“* (McCoshum & Geber 2020) aufgeführt. In beiden Fällen handelt es sich um Langzeitstudien über mehrere Jahre, welche mit dem Veröffentlichungsjahr 2020 ihre Ergebnisse präsentierten. Die übermittelten Erkenntnisse müssen dementsprechend bei neu angesetzten Forschungen mit einbezogen werden, um eine aufbauende Entwicklungsdynamik zu erreichen. Aus diesem Grund ist davon auszugehen, dass sich der positive Aufwärtstrend über die kommenden Jahre fortsetzen wird und die Thematik eine stetig stattfindende Relevanzsteigerung erfährt.

5.3.2 Organismengruppen

Folgender Abschnitt soll einen Überblick der tatsächlich untersuchten Gruppen von Lebewesen verschaffen. Die Aufschlüsselung der Gruppen gliedert sich dabei durch die ausgewertete Fachliteratur. Somit fand eine Einteilung in Flora, Avifauna, Bestäuber, Säugetiere, Sonstige, Reptilien und Amphibien statt. Jeder Artzusammensetzung kommt eine thematische und literaturspezifische Gewichtung zu. In aufgeführter Abbildung 15 ist dargestellt, wie viele Abhandlungen Aussagen über die jeweilige Organismusgruppe treffen.

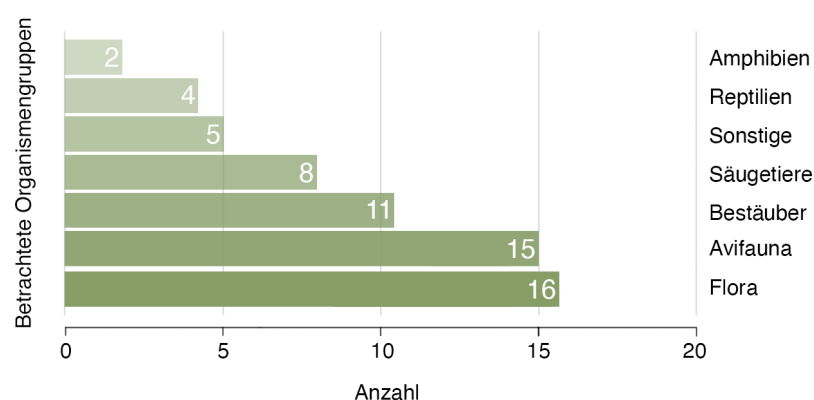


Abbildung 15: Balkendiagramm. Anzahl der ausgewertete Fachliteratur in Bezug auf betrachtete Organismengruppen
(Quelle: eigene Abbildung)

Dabei beschäftigen sich einzelne Fachtexte wie *„The Effects of Solar Farms on Local Biodiversity; A Comparative Study,“* (Montag et.al. 2016) mit mehreren

relevanten Organismen. Dementsprechend kann die hier aufgeführte Anzahl nicht gleich mit der ausgewerteten Literatur sein. Insbesondere Flora (16¹⁸), Avifauna (15) und Bestäuber (11) sind nach Auswertung der 43 wissenschaftlichen Texte weitreichend untersuchungsrelevant. Ein Zusammenhang kann dabei mit den Auswirkungen einer PV-FFA, welche diese Organismusgruppen standortunabhängig stets tangieren, erklärt werden. Hinzu kommt, dass gerade Flora und Bestäuber die Grundlage für Ökosystemdienstleistungen bilden. Dementsprechend sind die positiven und negativen Auswirkungen von PV-FFA als gleichermaßen relevant und wichtig zu verstehen, um die grundlegenden Funktionen der Biodiversität zu fördern. Säugetiere (8) sind oft durch Lebensraumzersiedelungen betroffen und nehmen aus diesem Grund ebenfalls einen wichtigen Punkt ein. In die Kategorie der Sonstigen (5) fallen unter anderem Untersuchungen zu Arthropoden¹⁹ oder Bakterien. Dadurch, dass die Lebensräume von Reptilien (4) und vornehmlich Amphibien (2) an einige besondere Standortbedingungen geknüpft sind, lässt sich die geringere Anzahl der Untersuchungen erklären. In der Regel benötigen Amphibien Zugang zum Wasser für die Fortpflanzung. Der Lebensraum Wasser ist jedoch in den meisten Fällen von PV-FFA nicht integriert. Demzufolge wird die Betrachtung dieser Organismusgruppe im Rahmen vieler Anlagen hinfällig.

5.3.3 Grundlegende Bewertung

Betrachtet man die Auswertung nach dem in *Kapitel 5.2.2* beschriebenen Bewertungssystem ohne Effektstärke, lässt sich ein deutlich positives Meinungs- und Forschungsbild erkennen. Hierbei ist zu betonen, dass die mit 0 bewerteten Fachtexte (8) nicht mit in das Auswertungsdiagramm (siehe Abbildung 16, S.35) eingeflossen sind. Für die Aussage der Ergebnispräsentation ist dies gemeinhin irrelevant. Wichtig dabei ist jedoch eine ausgelagerte Betrachtungsweise, da die neutralen Erkenntnisse weder für eine negative noch für eine positive bzw. für eine sich ausgleichende Wirkung von PV-FFA auf die lokale Biodiversität sprechen. Das wissenschaftliche Paper „*Sustainability of utility-scale solar energy – critical ecological concepts*“ (Moore-O’Leary et.al. 2017)

¹⁸ In Klammern aufgeführte Ziffern entsprechen der Anzahl an Literaturtexten.

¹⁹ Gliederfüßer.

beispielsweise basiert lediglich auf einer theoretischen Konzeptentwicklung, um einen Rahmen zur Reduzierung negativer Umweltauswirkungen zu bieten. Dabei wurden die Organismengruppen Bestäuber, Reptilien und Avifauna untersucht. Als Kernaussage wird von einer Generalisierung der Auswirkungen abgesehen, da jeder Art individuelle Ansprüche zukommen. Nach McCoshum & Geber (2020) ergab eine Untersuchung über fünf Jahre dass der potenzielle Lebensraumverlust durch PV-FFA für die untersuchten Bienenarten nicht bestätigt werden kann. Hier werden Entwicklungen von Stadterweiterungen als Hauptursache der Lebensraumzersiedelung angegeben. Im Rahmen der vorliegenden Auswertung klingt dies nach einer grundsätzlich positiven Bewertung für PV-FAA. Bei genauerer Betrachtung sind aber keine signifikanten Verbesserungen der Biodiversität aufgeführt, weswegen eine neutrale Codierung gewählt wurde. Die gelieferten Erkenntnisse der mit null bewerteten Literatur wurden also mit ihrer Wichtigkeit betrachtet. Da die übergeordnete Fragestellung der vorliegenden Arbeit auf klar positive und negative Effekte abzielt, wurden die neutralen Ergebnisse in der statistischen Auswertung und grafischen Darstellung außen vor gelassen, tragen aber zum Basiswissen für die Erarbeitung der später folgenden Handlungsempfehlung bei.

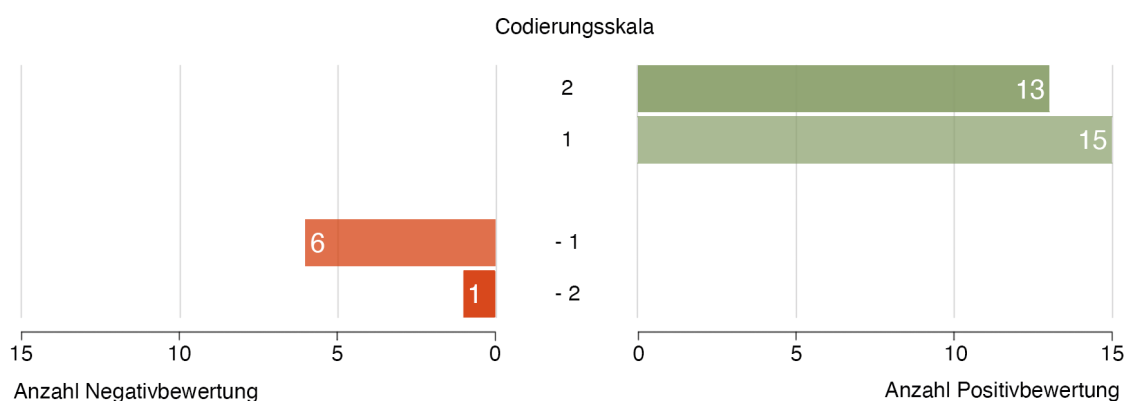


Abbildung 16: Auswertung nach 5-stufiger und grundlegender Codierungsskala ohne mit 0 bewertete Fachliteratur (8)
(Quelle: eigene Abbildung)

Beim Vergleich von anlagenbedingten Auswirkungen in positiver und negativer Hinsicht überwiegen die gewonnen Erkenntnisse, welche auf eine Verbesserung der Biodiversität durch PV-FFA verweisen (siehe Abbildung 16). Auf der negativ beurteilten Skala sind sieben Texte eingestuft, welche auf eine Verschlechterung

des Biodiversitätszustandes, durch das Betreiben von Solaranlagen auf Außenflächen, schließen. Unter anderem wurde ein wissenschaftliches Paper mit der Codierung -2, also *äußerst schlecht*, bewertet. Hier werden die zunehmenden Zerstörungen und Flächenverluste von Lebensräumen für Säugetiere aufgeführt. Als Aussage wird die kostengünstige Standortwahl über den Schutz von Lebensräumen und biologischer Vielfalt gestellt (Kim et.al. 2021). Unter diesem Gesichtspunkt lässt sich direkt ein wesentliches Problem erkennen, welches zweifelsfrei in zukünftigen Planungen berücksichtigt werden muss. Die sinnvolle Beschreibung der Einbindung in die bestehende Landschaft muss Planungsgrundlage für die Errichtung einer PV-FFA sein. Bei der mit *schlecht* bewerteten Literatur handelt es sich um fünf wissenschaftliche Paper und einen Projektbericht. Als Gründe für die nachteiligen Auswirkungen wurden u.a. Fragmentierungen bzw. Verdrängungseffekte (Lammerant et.al. 2020), Vogelsterblichkeiten (Kosciuch et.al. 2020 & Visser et.al. 2018) und Wärmeinseleffekte²⁰ (Barron-Gafford et.al. 2016 & Armstrong et.al. 2016) erfasst. Insbesondere die zuletzt genannte Problematik stellt eine wichtige, nicht außer Acht zu lassende Erkenntnis dar. Temperatureinflüsse auf die Umgebung und das Mikroklima stellen grundsätzlich einen entscheidenden Faktor für die Biodiversität dar. Nach Barron-Gafford et.al. (2016) geht dabei aus einer empirischen Datenerhebung einer PV-Anlage in Arizona ein Temperaturunterschied von drei bis vier Grad Celsius im Vergleich zur angrenzenden Umgebung hervor. Die beschriebenen Wärmeinseleffekte (siehe Abbildung 17, S. 37) werden durch die Veränderungen der Energieflussdynamik, aufgrund fehlender Vegetationsstrukturen und der damit verbundenen reduzierten Wärmeaufnahme des Bodens (orangene Pfeile) hervorgerufen. Wärmeableitende Energieflüsse gehen durch fehlende Evapotranspiration²¹ von Wasser und Vegetation verloren (blaue Pfeile). Somit entstehen verstärkt Wärme flüsse (rote Pfeile). Die Rückstrahlung von PV-Modulen (braune Pfeile) und die in Elektrizität umgewandelte Energie (lila Pfeil) verstärken den Effekt. Synergetische Strukturen von Anlage und der entsprechenden Aufwertung des

²⁰ Lokale Erwärmungseffekte durch Nutzungsänderungen der landschaftlichen Fläche.

²¹ Verdunstung aller Oberflächen inkl. Transpiration von Flora und Fauna.

Ökosystems stellen also zielführende und entgegenwirkende Maßnahmen zur Minderung dieses Effektes dar.

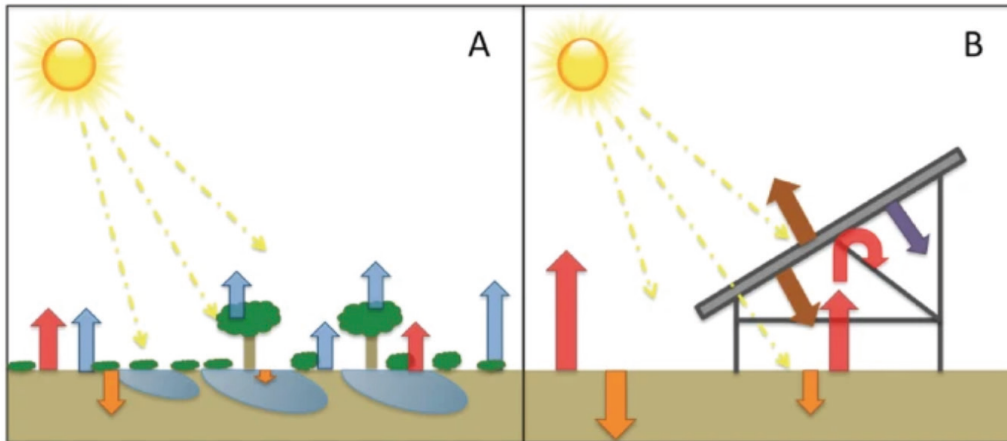


Abbildung 17: Vergleich der Energieflussdynamik bei einem bewachsenen Ökosystem und einer PV-FFA unter Annahme gleicher Mengen an einfallender Energie
(Quelle: Barron-Gafford et.al. 2016)

Durch die Betrachtung der mit *gut* (15) und *äußerst gut* (13) bewerteten Literatur, kann eine überwiegende und weitreichend positive Bilanz gezogen werden. In den Projektberichten (5), Studien (4) und wissenschaftlichen Papern (7) der Bewertungsstufe 1, wurden überwiegend die Auswirkungen auf Flora, Bestäuber und Avifauna untersucht. Unter anderem wurden dabei bereits biodiversitätsfördernde Maßnahmen in die Vorhaben integriert. Diese Erkenntnisse bieten einen wichtigen Grundbaustein im Hinblick auf den Effekt von angewandten Schritten in Richtung Synergie von PV-FFA und ökologischer Flächenaufwertung. Des Weiteren wurden aber auch Auswirkungen untersucht, welche sich anlagenbedingt und sukzessiv auf natürlichem Wege eingestellt haben. Nach Blaydes et.al. (2021) bieten Solarparks ein erhebliches Potenzial, die Bestäubervielfalt zu erhöhen. Die vorher als negativ betrachteten Wärmeinseleffekte werden unter der Option mikroklimatische Variationen zu erzeugen sogar als Chance gesehen. Wichtig sei hierbei jedoch die konsequente Überwachung vorher aufgestellter Managementstrategien. So kann die biologische Vielfalt insbesondere in Agrarlandschaften gefördert und eine „[...] Harmonisierung der Energieerzeugung, der Landwirtschaft und der Verbesserung der Ökosystemleistung [...]“ (Semeraro et.al. 2018) erreicht werden. Weitere Forschungsergebnisse haben gezeigt, dass PV-Anlagen in Klimazonen mit Wasserknappheit, aufgrund dynamischer Schattenführungen

durch nachgeführte Systeme, von einer niedrigeren Evapotranspiration²² profitieren können. Nach einer Auswertung von Peschel & Peschel (2023) belegen zahlreiche Beispiele von PV-FFA die Synergieeffekte von Solarparks und der Förderung von lokaler Biodiversität. Hinzu kommt eine 10 bis 53mal geringere gesamtheitliche Co2-Emission von PV im Vergleich zur Ölverbrennung (Tawalbeh et.al. 2020). Betrachtet wird dabei zudem der Herstellungsprozess, sodass das Ergebnis nicht nur auf lokale, sondern ebenso globale Auswirkungen hinsichtlich der Biodiversität hat. Die nach dem Bewertungssystem mit *äußerst gut* (13) klassifizierte Fachliteratur setzt sich ebenfalls aus Projektberichten (2), einer Studie und insbesondere referierten wissenschaftlichen Papern (10) zusammen. Hervorzuheben ist hierbei, dass das Erscheinungsjahr von annähernd zwei Drittel der Anzahl innerhalb der letzten drei Jahre liegt. Die positiven Ergebnisse werden also zusätzlich durch die Aktualität der Forschungsmethoden und Auswirkungen gestützt. Bei einer Beprobung von acht Untersuchungsstandorten in Kalifornien konnte eine beträchtliche Vielfalt und Häufigkeit von Arthropoden unter bodenmontierten PV-Anlagen nachgewiesen werden (Armstrong et.al. 2020). Hierbei handelt es sich um die Aufwertung von Parkplatzflächen, bei welchen insbesondere in die Vegetation integrierte Anlagen weitreichend positive Ergebnisse vorweisen. In Anbetracht dessen, dass Arthropoden eine Grundlage für funktionierende Ökosysteme darstellen, wird die Relevanz bezüglich der Biodiversität deutlich. Besonders die angesprochene Integration kann PV-Systeme Teil einer grünen Infrastruktur werden lassen (Semeraro et.al 2020) und die Möglichkeit eines stabilen und funktionierenden Ökosystems, unter Beherbergung einheimischer Pflanzen, bieten (Uldrijan et.al. 2021). Ergebnisse einer Untersuchung von fünf Anlagen nach Raab (2015) ließen bereits einige Jahre zuvor auf einen erstaunlich hohen Beitrag für die regionale Artenvielfalt schließen. Dabei waren die Anlagen auf vorher genutzten landwirtschaftlichen Flächen nicht weiter als 500m von Lieferbiotopen²³ bzw. bestehenden Lebensräumen entfernt. Dies führte dazu, dass beispielsweise 10 Pflanzen- und 26 Tierarten der *Roten Liste*²⁴, als bedeutendste Indikatoren für

²² Gesamtverdunstung der Landoberfläche (Wasser, Boden, Pflanzen usw.) in die Atmosphäre (Water Science School 2018).

²³ Bestehende Biotope, durch welche sich Arten auf die Umgebung ausbreiten können.

²⁴ Listung bedrohter Tier- und Pflanzenarten.

die naturschutzfachliche Bewertung, kartiert werden konnten. Eine Steigerung der Strukturvielfalt wurde u.a. durch kleine Tümpel innerhalb der Anlagen erreicht. Die zwei Anlagen mit der höchsten Vielfalt für die Biodiversität sind darüber hinaus die Ältesten, was auf eine benötigte Zeitspanne zur Entwicklung der Natur hindeutet. An dieser Stelle soll angemerkt werden, dass lediglich zwei Untersuchungen der gesamtheitlich ausgewerteten Literatur Rückschlüsse auf Beobachtungen von gefährdeten Arten nach *Roter Liste* liefern. Hier besteht noch mehr gezielter Forschungsbedarf. Dies setzt jedoch in keinem Fall die positiven Auswirkungen von PV-FFA, bestätigt durch die breite Mehrzahl an Fachliteratur, auf die Biodiversität herab.

5.3.4 Erweiterte Bewertung durch Effektstärken

Unter Hinzunahme der im *Kapitel 5.2.3* beschriebenen Effektstärke stellen sich verschiedene Interpretationsgrundlagen heraus. Der mit ursprünglich *neutral* codierten Fachliteratur wurden dabei gleichermaßen Effektstärken zugewiesen. Bei dem zugrunde liegenden Bewertungssystem, welches auf klare positive oder negative Resultate abzielt und auf die fundamentale Codierung aufbaut, spielt dies jedoch eine untergeordnete Rolle. Aus dieser Perspektive kommt den Forschungen im obenstehenden Diagramm (siehe Abbildung 18, S. 40) keine Gewichtung zu. Beginnend bei den Negativbewertungen (7), lässt sich ein klarer Trend im unteren Bereich erkennen. Dies liegt an den verhältnismäßig geringen Bedeutsamkeiten, welche der ausgewerteten Literatur zugeordnet wurden. Gesamtheitlich wurden so 2mal der Effektmultiplikator 1, 4mal der Effektmultiplikator 2 und 1mal der Effektmultiplikator 3 zugeordnet. Die Ergebnisse einer Untersuchung in Südafrika, zum Thema Vogelsterblichkeit, begründen sich beispielsweise auf einer 3-monatigen Datenerfassung von nur einer Anlage (Visser et.al. 2018). Hierbei handelt es sich zwar um die größte Anlage des Landes, aber dem kurzen Zeitraum und einem einzelnen Untersuchungsstandort geschuldet, kann hier keine höhere Effektstärke als 2 greifen. Der negative Peak von -3 erklärt sich durch eine reale Datenerhebung von über einem Jahr, bezogen auf drei vorherrschende Lebensgemeinschaften (Barron-Gafford et.al. 2016). Dieses bereits im Kapitel 5.3.3 *Grundlegende Bewertung* aufgegriffene wissenschaftliche Paper zur Thematik Wärminseleffekte, erhielt dabei im Vorfeld

die Codierung -1, gleichstehend für *schlecht*. Aufgrund der Effektstärke 3 kommt dieser Untersuchung die höchste Bedeutsamkeit im Rahmen des Negativblocks zu. Die weiteren niedrigen Effektstärken erklären sich u.a. durch die Begründung potenzieller standortspezifischer Auswirkungen durch lediglich Sekundärdaten (Lammerant et.al. 2020) oder Datenerhebungen in zu kurzen Zeiträumen bzw. einer geringen Anzahl von Anlagen (Visser et.al. 2018).

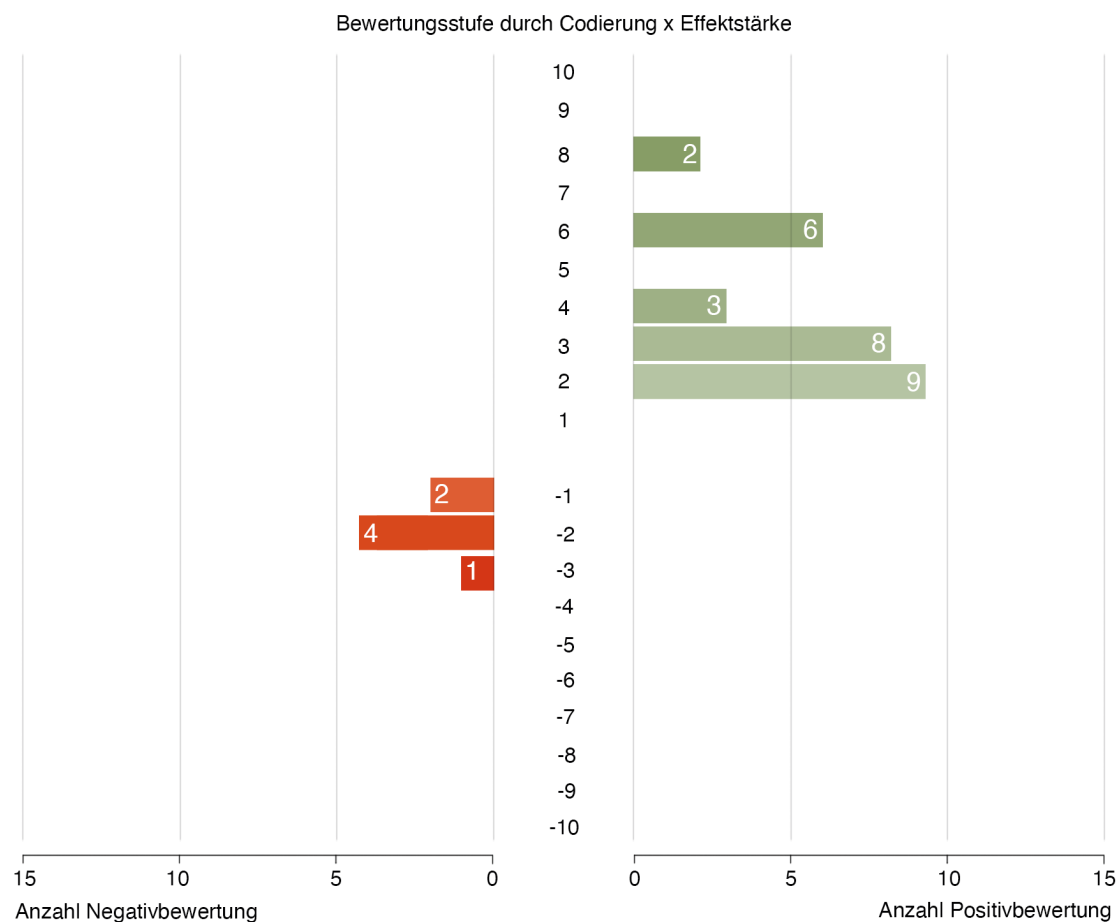


Abbildung 18: Erweiterte Auswertung durch Multiplikation der grundlegenden Codierung mit einer Effektstärke von 1 - 5 entsprechend der wissenschaftlichen Bedeutung der einzelnen Fachliteratur
(Quelle: eigene Abbildung)

Im Vergleich dessen zeichnen sich bei der positiv bewertenden Fachliteratur zweierlei Tendenzen mit einem überlagerten Peak von 8 ab. Bei diesem handelt es sich um die mit *äußerst gut* codierte Studie „*Solarparks - Gewinne für die Biodiversität*“ (Peschel et.al. 2019) und das in gleicher Weise bewertete Paper „*Modeling the ecosystem services of native vegetation management practices at solar energy facilities in the Midwestern United States*“ (Walston et.al. 2020). Beide

Untersuchungen erhielten eine Effektstärke von 4, da die Datenerhebung auf einer erheblichen Vielzahl verschiedener Anlagen und Ökosystemdienstleistungen beruht. Unter dem mittleren Trend der Gesamtbewertung von 6 (6), liegt der größte Teil im Bereich 2 und 3. Hervorzuheben hierbei sei die Zuordnung der Effektstärke 1 bei lediglich 3 Arbeiten. Dabei handelt es sich um einen Projektbericht mit minderem wissenschaftlichen Anspruch (bne 2021) und einem Paper, welches keinem realen Anwendungsbeispiel sondern einer theoretischen Studie unterliegt (Semeraro 2020). Die dritte Arbeit ist ein Projektbericht, welcher zwar die Datenerfassung einer realen Anlage widerspiegelt, sich jedoch nur auf eine geringe Flächengröße von 3ha beläuft und bereits gezielte biodiversitätsfördernde Strategien zur Doppelnutzung angelegt wurden. Alle weiteren analysierten Fachbeiträge liegen im Effektstärkenbereich 2 (8), 3 (14) und 4 (3). Unter Betrachtung der Hinzunahme überwiegend hoher Effektstärken bei mehr als einem Drittel der Literatur, welche durch das aufgewendete Forschungsengagement zu erklären ist, wird das deutlich positive Resultat fundamental Unterstrichen.

5.3.5 Aussagen zu biodiversitätsfördernden Maßnahmen

Den wissenschaftlichen Sockel für den im *Kapitel 6* folgend beschriebenen Kriterienkatalog bieten die analysierten Erkenntnisse zu den Auswirkungen bereits angewandter oder Bezug zu Maßnahmen und Strategien. Von den insgesamt 43 ausgewerteten wissenschaftlichen Beiträgen, sprechen sich fast die Hälfte für Empfehlungen zu einer Biodiversitätsförderung aus bzw. liefern zugleich direkte Ergebnisse zur Wirksamkeit angewandter Initiativen und Methoden (siehe Abbildung 19).

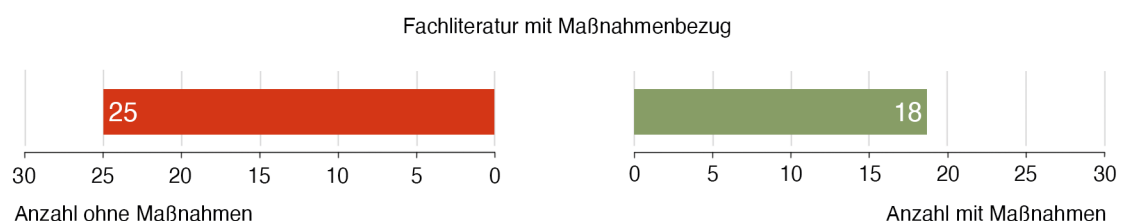


Abbildung 19: Anzahl der ausgewerteten Fachliteratur bezüglich konkreter Aussagen zu Maßnahmen oder Maßnahmenvorschlägen
(Quelle: eigene Abbildung)

Diese Tatsache unterstützt darüber hinaus den Stellenwert der Thematik und zeigt, dass sich bereits seit mehreren Jahren mit Ansätzen zur besseren Synergie zwischen nachhaltigen Solarstrom und Naturschutz beschäftigt wird. Die Gegenposition bilden 25 Arbeiten, welche keine konkreten Maßnahmen zum Vorschlag bringen. Hier werden keine Rückschlüsse aus den gewonnenen Forschungserkenntnisse gezogen. Hervorzuheben ist, dass es sich beim Filtern der Texte mit Handlungsempfehlungen fast ausschließlich um Arbeiten der Bewertungscodierung *gut* (8), *äußerst gut* (7) und relativ hohen Effektstärken handelt. Zwei *neutral* und ein *äußerst schlecht* bewertetes Paper vervollständigen die gefilterte Anzahl. Obwohl zuletzt genannte wissenschaftliche Ausarbeitung klare Position für die Zerstörung von Lebensräumen und Flächenverlusten durch PV-FFA einnimmt, findet eine Schlussfolgerung mit der „*Notwendigkeit einer proaktiven Bewertung, um nachhaltige Standortauswahlkriterien für Solar-PVs in Initiativen für erneuerbare Energien durchzusetzen*“ statt (Kim et.al. 2021). Neben der Standortauswahl kommen in der Vielfalt der Fachliteratur bereits konkrete Maßnahmen bzw. Maßnahmenvorschläge, bezogen auf alle relevanten Organismengruppen, zum Tragen. In der breiten Masse finden dabei jedoch gezielt Avifauna (7), Flora (7) und Bestäuber (7) Erwähnung. Auffällig dabei sind wiederkehrende Aussagen zu Abständen der Modulreihen und Einbringung verschiedener vegetativer Strukturelemente, wie das Vorhandensein attraktiver Blütenpflanzen von Frühling bis Spätsommer, um Nahrungs- und Nistmöglichkeiten zu bieten (Wit & Biesmeijer 2020). Dies beinhaltet ebenso Pflege und Management nach Fertigstellung und Inbetriebnahme der Anlage. Nach Peschel et.al. (2019) können so extensive Nutzungen durch Imkereien, Gärtnereien oder Beweidungsformen greifen. Denkbar wäre dabei eine Art der Zonierung, um ein möglichst breites Spektrum an Organismengruppen, abhängig der angrenzenden Lieferbiotope und Anforderungen vorherrschender Arten, abzudecken.

6. Handlungsempfehlung

Durch die genauere Betrachtung der ausgewerteten Fachliteratur und der Hinzunahme bereits angewendeter biodiversitätsfördernder Maßnahmen bzw. Maßnahmenvorschläge und der nachweislich aufgeführten Auswirkungen dieser,

soll die folgende Handlungsempfehlung gestützt werden. Die bereits erhobenen und zuvor herausgefilterten Daten, im Rahmen realer Projekte, bieten hier die optimale Grundlage. Ziel ist ein Kriterien- bzw. Maßnahmenkatalog, welcher sich auf die zuvor angewandte Bewertungsmatrix bezieht. Mit diesem Hintergrund sollen Standards initiiert werden, welche beispielsweise zur weiterführenden Ausarbeitung einer DIN SPEC²⁵ für eine Art Biodiversitäts-Siegel dienen. An dieser Stelle muss erwähnt werden, dass in der jüngsten Vergangenheit bereits qualitative Literatur in dieser Richtung publiziert wurde. „*Der naturverträgliche Ausbau der Photovoltaik*“ (NABU 2021), „*Umweltverträgliche Standortsteuerung von Solarfreiflächenanlagen*“ (Günnewig et.al. 2022) oder die „*Gute Planung von PV-Freiflächenanlagen*“ (bne 2022) sind dabei hochaktuell zu nennende Leitfäden. Die hier ausgeführten Handlungshinweise stellen keine Konkurrenzkriterien dar. Vielmehr ist im Rahmen der Thematik ein ganzheitliches Zusammenspiel der Fachkenntnisse notwendig, um ein adäquates und dem gemeinsamen Interesse dienendes Gesamtpaket zu schnüren.

Die ausgearbeiteten Kernpunkte der Handlungsempfehlung spiegeln sich in einem 5-teiligen Kreislaufsystem wider (siehe Abbildung 20, S. 44). Dabei werden fünf Phasen beschrieben und in jeweils zwei Ebenen eingeteilt, welche Initiativen biodiversitätsfördernder Maßnahmen, in und um eine PV-FFA, integrieren. Die grundlegende Zielsetzung einer angemessenen Wirtschaftlichkeit und einer möglichen Aufwertung des Ist-Zustandes steht dabei im Vordergrund. Die aufeinanderfolgenden, übergeordneten Phasen gliedern sich in Standortauswahl, Planung, Bauen, Betrieb und Recycling und werden im Weiteren genauer ausgeführt. Die erste untergeordnete Ebene beinhaltet phasengerechte Kategorien, welche sich über die zweite Ebene in insgesamt 68 entsprechend konkretisierte Maßnahmenvorschläge aufgliedern. Dabei können und sollen, je nach Projekt und Standort, nicht alle möglichen Maßnahmen eingehalten und berücksichtigt werden. Das Prinzip zielt auf ein Erreichen von min. 75%, also insgesamt 51 angewendeter Maßnahmen mit der Berücksichtigung jeder Phase ab. So kann die Stellung einer Biodiversitäts-Freiflächenanlage erreicht werden. Dies ermöglicht Initiator*innen einer solchen Anlagenidee die faire Möglichkeit

²⁵ Ein, mit dem Deutschen Institut für Normung, gemeinsam gesetzter Standard durch eine Person oder Organisation (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2023)

der Umsetzung mit einer gleichzeitig funktionierenden und vollwertigen Biodiversitätsförderung. Die Idee des Systems soll demzufolge eine verständliche Zugänglichkeit bieten und wird durch ein einfach gehaltenes, anschließendes Anwendungsszenario im *Kapitel 7 Anwendungsbeispiel* genauer verdeutlicht.

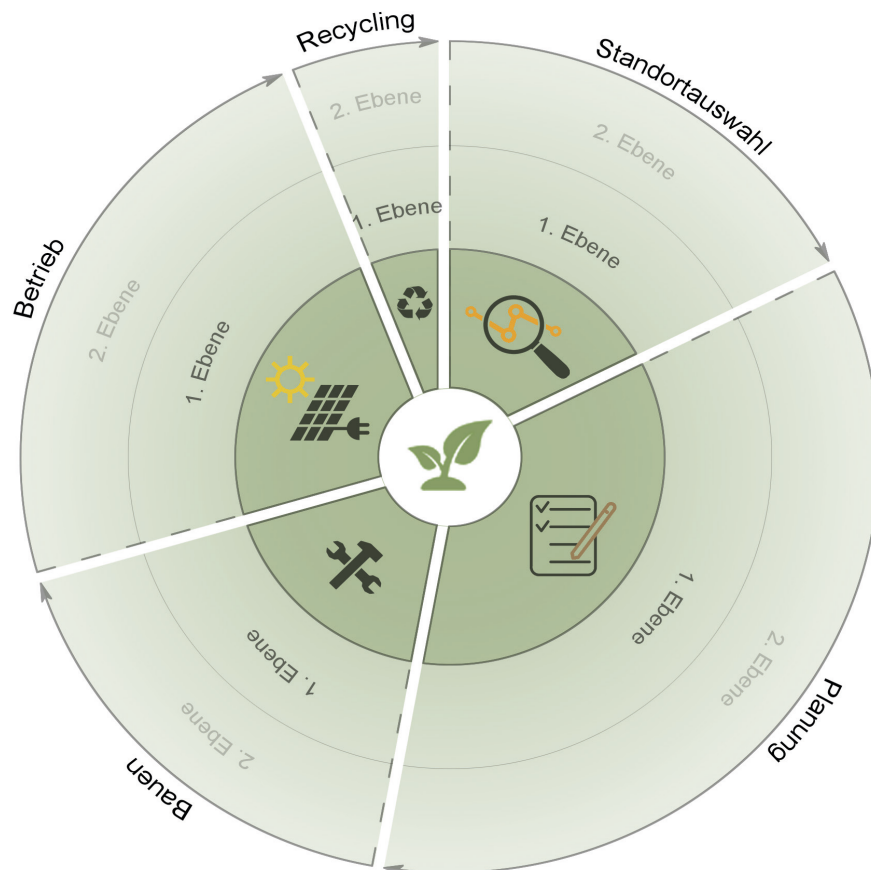


Abbildung 20: Grundlegendes Anwendungsprinzip des Kreislaufsystems mit 5 übergeordneten Phasen
(Quelle: eigene Abbildung)

6.1 Standortwahl

Für die Evaluation eines geeigneten Standortes ist die Zuhilfenahme eines geografischen Informationssystems (GIS) dringend zu empfehlen. Dabei handelt es sich um ein computergestütztes Programm „zur [geografischen A.d.V] Erfassung, Verwaltung und Analyse von Daten“ (esri Deutschland o.J.). Demnach können räumliche Zusammenhänge in Kombination mit naturschutzfachlichen Zusammenhängen schnell und kleinmaßstäblich

erkannt sowie dargestellt werden. Dies bietet eine essenzielle Grundlage für erste Analyseerkenntnisse und das spätere Planungsverfahren. Die Phase der Standortauswahl gliedert sich über die erste Ebene in vier Kategorien. Dabei wird die *Flächengröße*, die *Flächenauswahl*, die *Wirtschaftlichkeit* und das *Naturschutzmonitoring* betrachtet (siehe Abbildung 21).

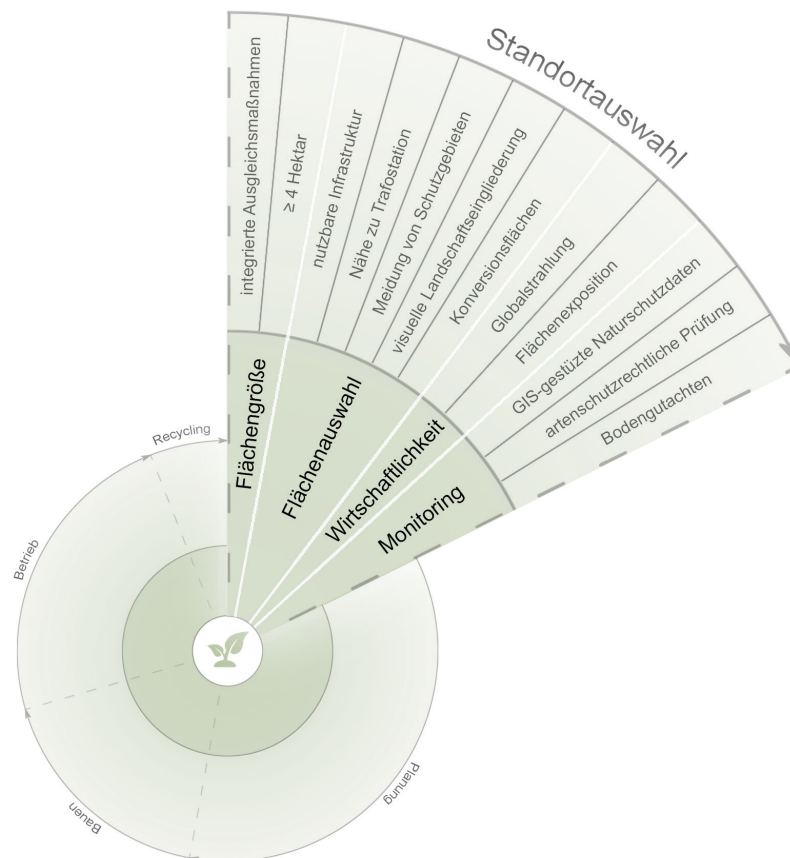


Abbildung 21: Maßnahmenkatalog der ersten Phase Standortauswahl
(Quelle: eigene Abbildung)

Inhalt der ersten Kategorie *Flächengröße* sind die Maßnahmenvorschläge von einer Anlagengröße von min. 4 ha und integrierten Ausgleichsmaßnahmen. Die im Kapitel 2.2.4 *Freiflächen-Photovoltaik* wirtschaftlich überbaute Flächengröße von 20.000m² ist maßgebend für diese Vorgabe. Durch eine Verdoppelung der Einheit kann die Wirtschaftlichkeit der Anlage sicher gestellt und gleichzeitig genug Raum für Biodiversitätsstrukturen eingeräumt werden. Dies geht mit den

Ausgleichsmaßnahmen einher. Hier sollte das Ziel sein, diese nicht auslagern zu müssen und direkt in die Gesamtfläche der geplanten Anlage zu integrieren.

Die zweite Kategorie der *Flächenauswahl* beinhaltet fünf Maßnahmenvorschläge. Diese widmen sich der Filterung vorhandener Infrastrukturen, welche zum Bau und Betrieb genutzt werden können, um Neuanlegungen weitestgehend zu vermeiden. Außerdem sollte die Entfernung zu der nächstgelegenen Trafostation nicht mehr wie 5 km betragen. Bei Einhalten der Bedingung sind lange Kabeltrassen und damit verbundene Bodenbewegungen zur Einspeisung des gewonnen Stroms nicht notwendig. Bei der Auswahl einer potenziellen Fläche ist die Vermeidung von Schutzgebieten ebenso essentiell. Konzentriert wird sich hierbei auf den, im Vorfeld eruierten, Ausschluss von Wasserschutzgebieten, Naturschutzgebieten, Nationalparks, Biosphärenreservate, §30 BNatSchG Biotopen und Natura2000- bzw. FFH-Gebiete (Flora Fauna Habitat). Eine Nähe zu solchen Flächen stellt eine zusätzliche Option dar, da diese als direkte Lieferbiotope funktionieren und so die Artenvielfalt innerhalb einer PV-FFA vorantreiben können. Zur Akzeptanzsteigerung, insbesondere betroffener Anwohner und Naturliebhaber, ist die visuelle Eingliederung in die Landschaft ebenfalls entscheidend. Hier soll bei der Flächensuche bereits im Vorfeld auf Hangneigungen, vorhandene topografische Senken und Vegetationsstrukturen geachtet werden. Idealerweise kann eine Anlage so gestaltet werden, dass sie das Landschaftsbild lediglich in einem geringen Maße beeinflusst und somit keinen visuellen Störfaktor darstellt. Als letzten Maßnahmenvorschlag dieser Kategorie ist die Nutzung von Konversions- oder ertraglich schwachen Ackerflächen gelistet. Anhand der, durch die Analyse, gewonnen Erkenntnisse, haben diese Flächen das größte Aufwertungspotenzial im Vergleich zur Vornutzung. Ertraglich schwache Ackerflächen werden dabei von einer Bodenkennzahl unter 40 gekennzeichnet.

Unter die dritte Kategorie der *Wirtschaftlichkeit* fällt die Standortauswahl unter Berücksichtigung einer angemessenen Globalstrahlung. Hierbei ist die ortsabhängig einfallende Sonneneinstrahlung, gemessen in kWh pro m², auf den Boden gemeint (DWD o.J.). Es sollte auf einen Wert gemäß dem regionalen Jahresmittelwert geachtet werden, um eine PV-FFA sinnvoll zu platzieren. Des Weiteren ist die Modulausrichtung nach Himmelsrichtung essentiell. Dabei

kann eine nordexponierte Ausrichtung zu keinem wirtschaftlichen Erfolg führen, weshalb beispielsweise Hangflächen dieser Neigung außer Betracht gelassen werden sollten. Mit einem hohen Ertrag kann bei weitestgehend südexponierten Flächen gerechnet werden.

Die letzte Kategorie dieser Phase beinhaltet Initiativen bezüglich Instrumenten zum *Naturschutzmonitoring*. Die Beschaffung und der Vorabgleich vorhandener naturschutzfachlicher Datensätze, mit beispielsweise verzeichnenden Arten oder Zugvogelstrecken, kann im Vorfeld bereits viel Aufschluss geben und mögliche Konflikte vermeiden. Dazu ist eine spezielle artenschutzrechtliche Prüfung durch ein Fachbüro zu empfehlen, um den IST - Zustand vor der Planung zu dokumentieren und eventuelle naturschutzfachliche Einschränkungen frühzeitig zu erkennen. Hierbei sollte nicht nur die in Betracht gezogenen Fläche untersucht werden, sondern eine Verfahrenserweiterung in einem 500m Umkreis stattfinden. So können mögliche Beeinträchtigungen bzw. Lieferbiotope erkannt werden, um die anschließende Planung der Anlage dahingehend auszurichten. Die anlagebedingte Bauweise, durch die im Erdreich aufgeständerten Systeme, erfordert einen geotechnischen Bericht in Form eines Bodengutachtens. Durch dieses Verfahren kann die optimale Einbindtiefe für die örtliche Bodenbeschaffenheit ermittelt werden, um die Standsicherheit zu gewährleisten und gleichzeitig unnötig lange Profile zu vermeiden. Außerdem werden Erkenntnisse über den ökologischen Wert des Bodens ermittelt, was eine angepasste Planung der Modulsysteme ermöglicht.

6.2 Planung

Die Phase der Planung nimmt im gesamtheitlichen Kreislaufsystem die größte Position, mit den meisten Maßnahmenvorschlägen, ein. Dies ist dem geschuldet, dass hier eine Vielzahl an Maßnahmen integriert wurden, welche ebenso in der folgenden Phase Bauen Anwendung finden könnten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde sich aber für diese Variante entschieden, mit der Prämisse die angesetzten Maßnahmen der vorausgehenden Planung verpflichtend baulich umzusetzen. So kann bereits im Vorfeld eine adäquate und gezielte Strategie entwickelt werden, welche Strukturen und Elemente in die zukünftige Anlage implementieren soll. Die Phase gliedert sich dabei in erster Ebene durch die

Kategorien *Module*, *Einfriedung*, *Vegetation*, *Strukturelemente zur Förderung der Fauna*, *Versiegelung* und *Erhalt mit Förderung* (siehe Abbildung 22, S. 48).



Abbildung 22: Maßnahmenkatalog der zweiten Phase Planung
(Quelle: eigene Abbildung)

Die erste Kategorie mit Inhalten zur Planung verwendeter *Module* setzt u.a. die Bodenfreiheit der Modulunterkante von min. 80 cm voraus. So kann genügend Raum und Lichteinfall für die darunter befindliche Vegetation sicher gestellt werden. Des Weiteren haben beispielsweise Schafe, bei einer in Betracht zu ziehenden Beweidung, genug Platz zum Aufenthalt unter und zwischen den Modultischen. Ähnliches gilt für Säugetiere, welche die Anlage queren. Weiterhin wird die Aufständigung der Module vorgeschlagen, welche die Notwendigkeit von Betonfundamenten ausschließt. Aufgrund dieser Bauweise werden Ressourcen gespart und ein späterer rückstandsloser Abbau der Anlage vereinfacht, ohne Verbleib von Altlasten im Boden. Für den Ablauf von anfallendem Regenwasser können Rinnen am unteren Ende der Modultische

dienen. Dies verhindert ein Ausspülen und -waschen der Bodenbereiche, auf welche das Wasser auftreffen würde und bietet gleichzeitig die Möglichkeit das Wasser in der Fläche zu halten, um eventuelle Feuchtbiootope zu speisen. Die Verwendung von Doppelglasmodulen führt zu mehr Robustheit und einer damit verbundenen Langlebigkeit der Anlage. Die maximale Flächendeckung der gesamten Anlagenfläche sollte max. 50 - 60% betragen. So wird Bereichen der Vollverschattung entgegengewirkt und genug Sonnenlicht auf die Fläche gelassen. Verknüpft ist dies mit der maximalen Tiefe der Modultische von 3 - 5 m und einem Mindestabstand der Modulreihen von 5 m. Durch die entstehenden, lichtdurchflutenden Korridore wird sowohl der Vegetation als auch der Fauna genug Platz eingeräumt.

Die zweite Kategorie *Einfriedung* beschäftigt sich mit der Abgrenzung der geplanten Anlage. Anstatt konventioneller Einzäunung können Feldheckenstrukturen dienen. Diese sollten mindestens 3 m Breite haben, wodurch in gleichem Maße Lebensraum und Diebstahlschutz integriert wird. Für die allgemeine Sicherheit kann eine Ersteinzäunung aus natürlichen Material dienen. Diese ist nach ausreichender Ausbildung der Hecke hinfällig und verrottet. Zu Beachten ist hierbei gleichfalls eine Bodenfreiheit von min. 20 cm für Kleintiere und das Integrieren von Durchlässen mit Zugängen zu entsprechenden Wanderkorridoren für Säugetiere, welche in der Kategorie der Faunaförderung noch zum Tragen kommen.

Für weitere Förderungen der *Vegetation* soll eine ausschließliche Verwendung von regionalem und zertifiziertem Saatgut erfolgen. Das Anlegen von Blühstreifen mit standorttypischem Artenspektrum bringt weitere Vorteile mit sich. Hier kann sich beispielsweise auf die Randbereiche konzentriert werden, um Bestäubern eine weitreichende Nahrungsquelle zu bieten oder Nistmöglichkeiten für bodenbrütende Vögel bereitzustellen. Unter diesen Gesichtspunkten bieten Streuobstgehölze eine gute Möglichkeit der Vegetationsförderung. Diese sollten so verortet werden, dass es zu keiner Beeinflussung des Wirkungsgrades der Module durch Beschattung kommt.

Die vierte Kategorie in dieser Phase beschäftigt sich mit *Strukturelementen zur Förderung der Fauna*. Durch relativ einfache Möglichkeiten, können hier weitreichend fördernde Auswirkungen erzielt werden. So können

innerhalb der Anlage einzelne Bereiche als störungsarme Lebensräume für bodenbrütende Arten abgegrenzt werden. Sie bieten insbesondere Schutz vor Prädatoren. Zusätzlich können Nisthilfen geschaffen werden, um die Arten bei der Fortpflanzung zu unterstützen. Zum Schutz der anwachsenden Feldheckenstrukturen und als Hilfestellung zur Jagd dienen Greifvogelstangen mit einer Anzahl von zwei bis vier pro Hektar. Greifvögel nutzen folgend nicht die jungen Triebe der Heckenstrukturen und werden bei der sogenannten Ansitzjagd auf beispielsweise Beutetiere, lebend auf umliegenden Feldern, unterstützt. Steinschüttungen oder Sandhaufen sind als weitere Beispiele für Strukturelemente zu nennen. Sie bieten insbesondere Reptilien wie Echsen Lebensräume und Rückzugsorte. Eingebachte Totholzelemente erzielen ähnliche Wirkungen und Funktionen. Sie können zudem als Insektenhotels dienen und die Vielfalt auf der Fläche steigern. Außerdem ist zu empfehlen Wanderkorridore als Querungshilfen für größere Säugetiere freizuhalten. Diese müssen Anschluss zu den bereits angesprochenen Durchlässen der Einfriedung haben und sollten eine Mindestbreite von 50m vorweisen. Als letzte Maßnahme dieser Kategorie zählt das sinnvolle Anlegen von Feuchtbiotopen. Hier spielen Standortverhältnisse und -bedingungen eine große Rolle. Hinzu kommt, dass die Biotope nicht zwingend integriert oder angelegt werden müssen falls die betrachtete Fläche hierfür keine geeigneten Voraussetzungen bietet.

Die vorletzte Kategorie wird durch den Grad der *Versiegelung* gebildet. Dabei soll der Gesamtversiegelungsgrad, inklusive sämtlicher baulicher Anlagen, nicht mehr wie 5% einnehmen. Dieser Richtwert dient dem Zweck einer bewussten und nachhaltigen Beplanung der Fläche mit einem hohen Grad an nicht versiegelten Flächen zur Entfaltung des Ökosystems. Wird die Anlage auf zuvor versiegelten Konversionsflächen geplant, ist eine Entsiegelung maßgebend.

Komplementiert wird die Phase durch das Ziel von *Erhalt und Förderung*. Bereits vorhandene Biotopstrukturen innerhalb der potenziellen Fläche obliegen einer besonderen Betrachtung. Die Berücksichtigung und der Schutz dieser ist bereits bei der Planung im Vorfeld zu bedenken. Gleichmaßen sollen umliegende Lieferbiotope geschützt und falls notwendig bzw. zielführend gefördert werden. Sie können durch Ausbreitung in die PV-FFA einer schnelleren Integration

des Artenspektrums dienen und infolgedessen bereits nach kurzer Zeit die Ökosystemdienstleistung steigern.

6.3 Bau

In der dritten Phase wird die Thematik Bau mit seinen vier Kategorien ökologischen *Baubegleitung*, *Baustraßen*, *Baufahrzeuge* und *bestehende Biotopstrukturen* dargestellt. Zum Tragen kommen in dieser Phase folglich die Maßnahmenvorschläge, welche während der reinen Bauphase berücksichtigt werden können. Wie bereits im vorherigen Kapitel erwähnt, geht es dabei nicht unbedingt darum, was gebaut wird, sondern mehr um die Ausführung und Umsetzung der geplanten Kriterien (siehe Abbildung 23).

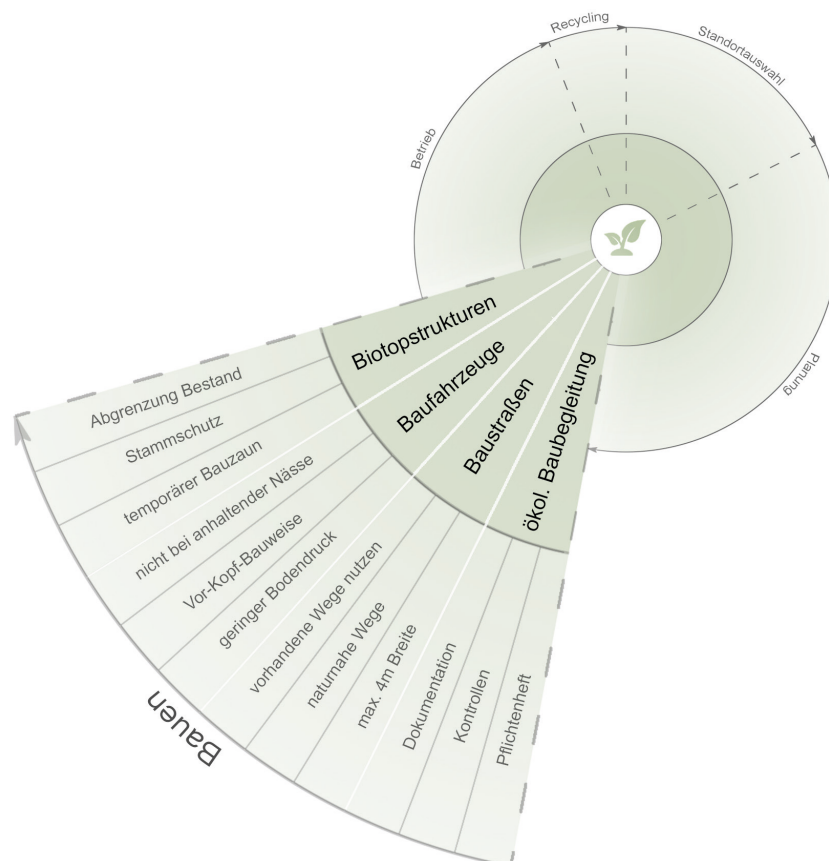


Abbildung 23: Maßnahmenkatalog der dritten Phase Bauen
(Quelle: eigene Abbildung)

Die erste Kategorie *ökologischen Baubegleitung* bildet dabei einen grundlegenden Faktor. Durch die Sensibilisierung für Umwelt- Naturschutzbelange ist sie ein wesentlicher Teil der Qualitätssicherung während der Bauausführung.

Durch die Erarbeitung eines Pflichtenheftes entsteht eine Art Anleitung zur umweltschonenden Ausführung des Vorhabens. Diese wird durch regelmäßige Kontrollen überprüft, welche außerdem die Chance einräumen, auf Veränderungen zu reagieren und entsprechende Maßnahmen einzuleiten. Eine stetige Dokumentation der Ereignisse hilft bei der späteren Nachvollziehbarkeit und kann bei Artveränderungen innerhalb der Fläche herangezogen werden.

Die zweite Kategorie konzentriert sich auf die *Baustraßen* in der ersten Ebene. Bei ihnen wird eine maximale Breite von 4 m vorausgesetzt. Dies gewährleistet eine angemessene Befahrbarkeit von benötigtem Groß- und Kleinfahrzeug, nimmt jedoch lediglich den mindestens erforderlichen Platz ein, um keine zusätzlichen Verdichtungen zu schaffen. In diesem Rahmen sollte die Zuwegung nicht vollversiegelt werden. Angeraten werden naturnahe Wege wie Schotterterrassen. Bereits vorhandene Wegestrukturen dürfen nicht außer Acht gelassen werden. Soweit es die bauliche Situation zulässt, ist es förderlich diese auf bestehende Infrastruktur anzupassen.

Für die benötigten *Baufahrzeuge* ist die Wahl zu Maschinen mit geringem Bodendruck bzw. Maßnahmen zur Druckverteilung, wie beispielsweise durch Baggermatratzen, anzuraten. So kann einer irreparablen Bodenverdichtung weitestgehend entgegengewirkt und Bodenorganismen geschont werden.

Während der Bauphase ist das Augenmerk ebenso auf *bestehenden Biotopstrukturen* zu richten. Sie obliegen einem besonderem Schutz und bilden den Grundstein für ein später entstehendes Ökosystem. Dafür ist die Abgrenzung von schützenswerten Bestand und Landschaftsobjekten von Nöten. Bestandsgehölze sollten durch einen Stammschutz vor Anfahrschäden oder anderen Störungen geschützt werden. Das Freihalten des Kronentraufbereiches plus 1,5 m, zum Schutz des Wurzelbereiches, spielt hierbei mit rein. Der, während der Bauphase, aufgestellte Bauzaun sollte bereits 20cm Bodenfreiheit und temporäre Durchlässe für querende Säugetiere vorweisen.

6.4 Betrieb

Die vierte Phase dient dem Ziel, die Förderung von Biodiversitätsstrukturen weiterhin während der Betriebsjahre der Anlage aufrecht zu erhalten und das Ökosystem stetig zu unterstützen. Zu diesem Zweck wurden vier

Kategorien in der ersten Ebene herausgebildet, welche sich in *Reinigung und Pflanzenschutz, Monitoring, Pflegemanagement* und *Wartungsarbeiten der technischen Anlagen* gliedern (siehe Abbildung 24, S. 53).

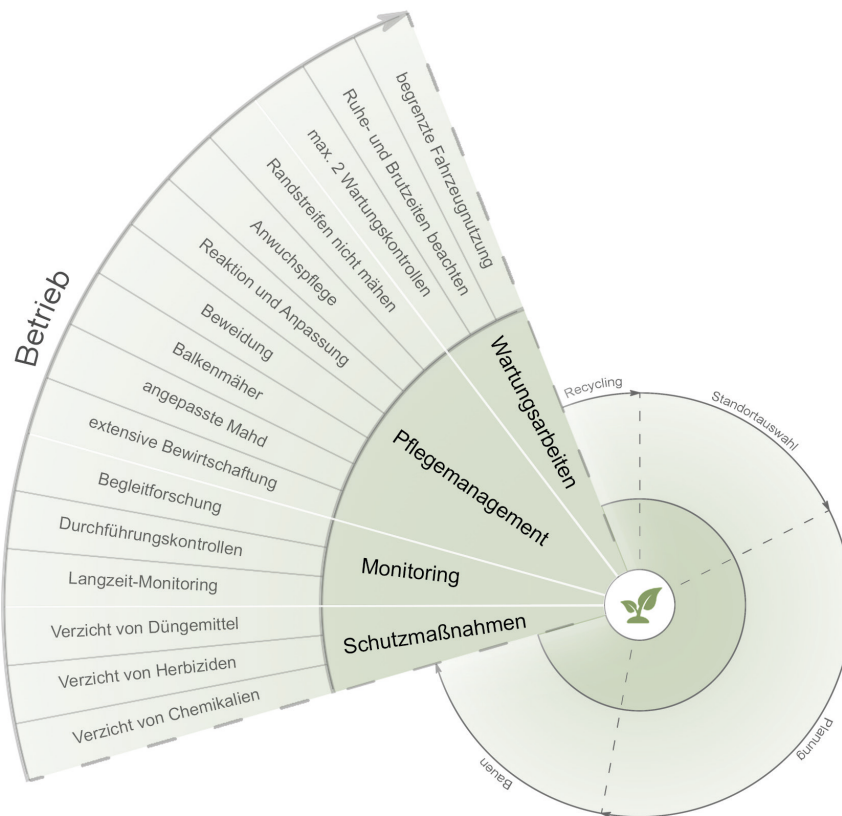


Abbildung 24: Maßnahmenkatalog der vierten Phase Betrieb
(Quelle: eigene Abbildung)

Unter die erste Kategorie fällt der Verzicht von Chemikalien zur Reinigung der Module. Dadurch gelangen keine schädlichen Stoffe in die Umwelt, wodurch eine Beeinträchtigung der Arten vermieden wird. Ein gleichwertiger Effekt wird durch den Verzicht von Herbiziden und Pestiziden erzielt. Von vermeidlich bodenverbessernden Maßnahmen, wie die Anwendung von Düngemitteln, sollte abgesehen werden.

Bezogen auf die zuvor beschriebene Bauphase, soll über den gesamten Betriebszeitraum ein entsprechendes *Monitoringverfahren* durch Fachpersonal durchgeführt werden. Damit setzt man sich ein Langzeit-Monitoring mit regelmäßiger Dokumentation und Erfolgskontrolle zum Ziel. Mit der Verknüpfung von Durchführungskontrollen der eingebundenen Maßnahmen können Veränderungen festgestellt und auf diese reagiert werden. Um weitere

Erkenntnisstände über PV-FFA und deren Auswirkungen auf die Umwelt zu gewinnen, können die Anlagen für zukünftige Initiativen der ökologischen Begleitforschung bereit gestellt werden.

Die dritte Kategorie umfasst wichtige Maßnahmenvorschläge bezüglich des *Pflegemanagements* von der errichteten und in Betrieb genommen Anlage. Zur erfolgreichen Aufwertung und Förderung der Biodiversität wäre eine naturnahe und extensive Bewirtschaftung zielführend. Eine standortangepasste Mahd inklusive Entnahme des Mahdgutes kann zweimal jährlich erfolgen und sollte in einem Wechsel jeder zweiten Reihe statt finden. Die Entnahme der Mahd bringt den Vorteil, dem Boden keine weiteren Nährstoffe zuzuführen. Außerdem wird so einer Überdeckung und Verschattung des Bodens entgegengewirkt, um die Chancen des Artenreichtums und der Konkurrenzfähigkeit zu erhöhen. Eine Mahdgutübertragung auf eine sinnvoll ausgewählte Empfängerfläche könnte in Betracht gezogen werden. Andernfalls kann die Mahd zur Gewinnung von Energie durch Biogasanlagen genutzt werden. Wird die Mahd im Wechsel jeder zweiten Reihe durchgeführt, verbleiben für bewohnende Arten der Fauna stets Möglichkeiten zur Umsiedelung in Blüh- und Deckungsangeboten. Die Mahd sollte mit Balkenmähern mit mindestens 10 cm Bodenhöhe erfolgen. Dies minimiert das Verletzungs- und Tötungsrisiko am Boden lebender Kleinsäuger und Insekten. Dabei können Blührandstreifen ausgenommen werden. Dies schützt Arten, die empfindlich auf eine Mahd reagieren und bietet Lebensraumoptionen für Tiere, welche sich beispielsweise verholzte Pflanzenstängel zu Nutze machen. Daneben wirken dauerhaft begrünte Randstreifen möglichen Erosionen auf Hangflächen entgegen. Eine weitere denkbare Möglichkeit der Pflege ist eine Beweidung durch Weidetiere wie beispielsweise Schafe in einer angemessenen Besatzdichte. Diese ist abhängig von der zur Verfügung stehenden Fläche und Anordnung der Modulreihen. Auf, durch das Monitoring festgestellte, Veränderungen der Flora und Fauna sollte eine Reaktion und Anpassung des Pflegemanagements erfolgen. Nach baulicher Fertigstellung der Anlage, ist über eine Anwuchspflege zur schnellen Förderung der Ökosystemdienstleistung

nachzudenken. Darin inbegriffen ist u.a. die Bewässerung sowie Erziehungs- und Pflegeschnitte von neu angelegten Heckenstrukturen und Gehölzen.

Zur Phase des Betriebs gehören in gleicher Weise die *Wartungsarbeiten der technischen Anlagen*. Diese gehen ebenfalls von der Beachtung zielführender Vorgaben aus, um unnötige Störfaktoren zu minimieren. So ist anzuraten maximal zwei Wartungskontrollen im Jahr erfolgen zu lassen, insofern Defekte oder Störungen der Anlage kein zusätzliches Nachgehen erfordern. Wichtig dabei ist, dass die Kontrollen außerhalb von Ruhe- und Brutzeiten stattfinden. Außerdem ist auf eine begrenzte Nutzung von Fahrzeugen zu achten. Insoweit diese unerlässlich sind, gilt das Gebot der verminderten Licht-, Lärm- und Schadstoffemission.

6.5 Recycling

Die abschließende Phase des entwickelten Kreislaufsystems beinhaltet die drei Kategorien *Rückbau*, *Entsorgung* und *Repowering* (siehe Abbildung 25).

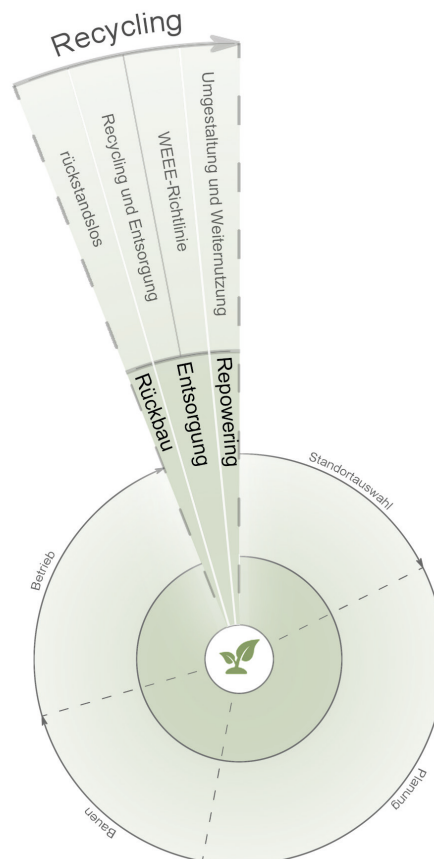


Abbildung 25: Maßnahmenkatalog der fünften Phase Recycling
(Quelle: eigene Abbildung)

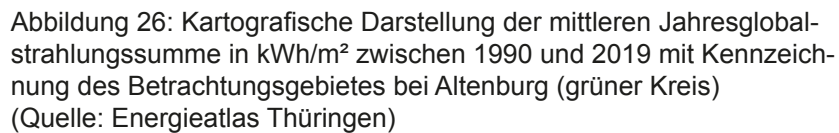
Der *Rückbau* sollte dabei vollständig und rückstandslos inklusive aller verlegter Kabel und eventueller Fundamente der technischen Gebäudeanlagen erfolgen. Ausgenommen davon sind angelegte Vegetationsstrukturen und entwickelte Biotope, welche zwingend bestehen bleiben und beim Rückbau der Anlage geschützt werden sollten. So bleibt eine Flächenaufwertung zukünftig erhalten und kann weiter voranschreiten.

Die anschließende *Entsorgung* sollte nach strenger Trennung der einzelnen Materialien und Bauteile erfolgen. Hersteller haben nach der europäischen Richtlinie Waste Electrical and Electronic Equipment (WEEE) die Pflicht, Bauteile, die in den Wertstoffkreislauf rückführbar sind, zurückzunehmen. Dies betrifft prinzipiell alle Komponenten elektronischer Altgeräte. Diese können über Sammelstellen zertifiziert recycelt oder weiterverwendet werden. Die abschließende Option bietet das *Repowering* der Anlage. Hierbei kann über eine sinnvolle Umgestaltung entschieden werden, um ältere Komponenten durch neuwertige und mit einem höheren Wirkungsgrad funktionierende Technologien zu ersetzen. Denkbar wäre dies beispielsweise nach Ablauf der 20-jährigen Förderung nach EEG im Rahmen eines PPA (siehe *Kapitel 4.4 Vergütungen nach EEG 2023* und *4.5 Power Purchase Agreement*).

7. Anwendungsbeispiel

Das Prinzip des zuvor aufgestellten Kriterienkatalogs wird im Folgenden, anhand eines fiktiven aber durchaus umsetzbaren Szenarios innerhalb Thüringens noch einmal genauer verdeutlicht. Da es sich hier nicht um ein reales Anwendungsbeispiel handelt, werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausschließlich die erste Phase Standortauswahl, zur Erklärung des anzuwendenden Prinzips, dargestellt. Mit Hilfe der visuellen Darstellung des Kreislaufsystems (siehe Abbildung 30, S. 61) wird das Verständnis für das weitere Verfahren geschaffen. Als grundlegende Quelle für alle relevanten Geodaten diente in diesem Zusammenhang das *Geoportal Thüringen*. Über die Verarbeitung und Auswertung dieser Daten durch die GIS-gestützte Software *QG/S* wurde eine adäquate Basis für die weitere Planungsebene geschaffen. Diese erfolgte im Anschluss mit der CAD-Software (Computer-Aided Design) *Vectorworks*.

Die Annäherung an ein entsprechendes Potenzialgebiet fand zunächst über die kartografische Darstellung der Globalstrahlung in Thüringen statt (siehe Abbildung 26).



Gemessen in kWh/m² stehen die Daten über den *Energieatlas Thüringen* frei zur Verfügung. Da ein wirtschaftlicher Erfolg und folglich die Sinnhaftigkeit für die Errichtung einer PV-FFA von den Einstrahlungswerten abhängig ist, wurde sich demnach auf den Bereich mit der höchsten Jahresglobalstrahlungssumme im Bundesland konzentriert. Dies ist mitunter nicht immer der Ausschlag gebende Faktor, stellt allerdings eine effektive Methode für die Herangehensweise dar. Die Werte in Thüringen bewegen sich von 900 kWh/m² bis 1030 kWh/m². Dabei weist die Region am östlichen Zipfel bei Altenburg den höchsten Wert auf und wird im weiteren Verlauf auf die Standortauswahlkriterien, gemäß Maßnahmenkatalog (siehe *Kapitel 6.1 Standortwahl*), untersucht. Unter Hinzunahme von Landnutzungsdaten wurde das Gebiet auf seine unterschiedlichen Flächennutzungskategorien aufgeschlüsselt. Durch die

frei zugänglichen Geodaten vom *Geoportal Thüringen* gliedern sich diese in bebaute Flächen, Gewässer, Grünland, Ackerland und Wald. Ziel dabei war es, mögliche Konversionsflächen oder landwirtschaftlich genutzte Gebiete in einer relativ naturnahen Umgebung zu filtern, bei welchen ein biodiversitätsfördernder Umbruch mit Flächenumnutzung stattfinden kann.

Mit diesen Rahmenbedingungen erfolgte eine weitere Eingrenzung des möglichen Potenzialgebietes (siehe Abbildung 27).

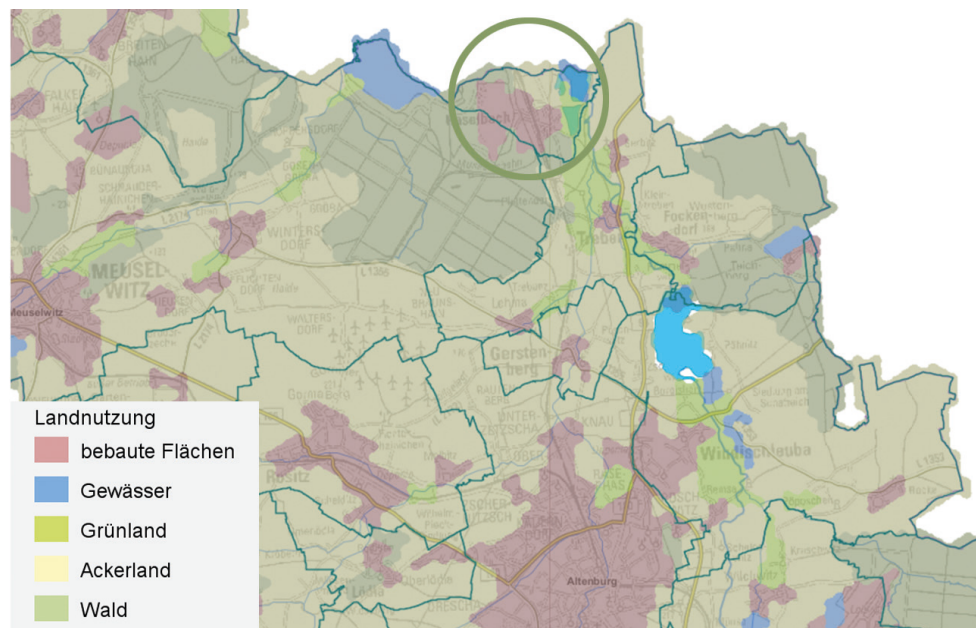


Abbildung 27: Dargestellte Landnutzung in 5 Kategorien unter Hinzunahme der Gemeindeabgrenzungen und Darstellung der näher zu betrachteten Flächen (grüner Kreis)

(Quelle: Kartendienst des TLUBN)

Dabei handelt es sich um kleinere, ackerbaulich genutzte Flächen nördlich der Gemeinde Haselbach an der Grenze zu Sachsen. Die Region zählt zum Leipziger Neuseenland und ist maßgeblich vom Braunkohletagebau mit ca. 56 ha Wasserfläche geprägt (Verwaltungsgemeinschaft Pleißenau, o.J.). In der späteren Planungsphase kann die Nähe zu einem oder mehreren Tagebauseen einen entscheidenden Faktor darstellen und wird bereits an dieser Stelle zur Sprache gebracht.

Der anschließende Schritt umfasste die Auswertung sämtlicher zur Verfügung stehender Naturschutzfachdaten des *Geoportal Thüringen*. In der großmaßstäblichen Betrachtung sind mehrere Schutzkategorien ausgewiesen. Darunter zählen das *Nordöstliche Altenburger Land* als

EU-Vogelschutzgebiet, auch SPA (Special Protected Area) genannt, das NSG (Naturschutzgebiet) *Haselbacher Teiche* und das FFH-Gebiet *Haselbacher Teiche und Pleißeau*, welche östlich angrenzen (siehe Abbildung 28).

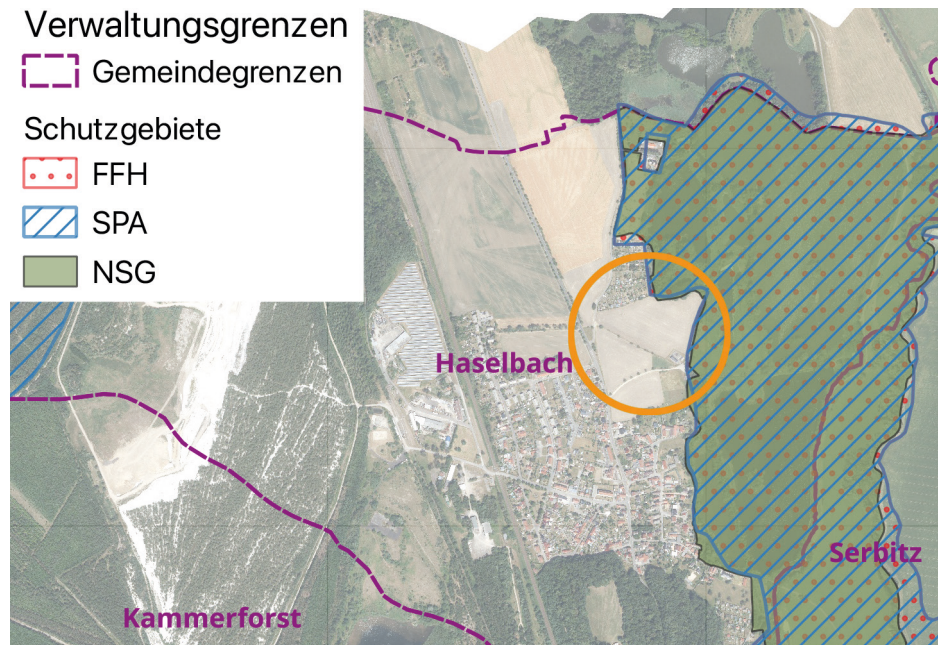


Abbildung 28: Filterung einer möglichen Potenzialfläche (orangener Kreis) unter Hinzunahme von Naturschutzdaten als Ausschlusskriterien (Quelle: Kartendienst des TLUBN)

Der Bau einer Anlage innerhalb der Schutzgebiete ist nach Maßnahmenkatalog ein strenges Ausschlusskriterium. Die räumliche Nähe kann bei einer angepassten Planung jedoch einen entscheidenden Vorteil mitbringen, da somit direkte Lieferbiotope in nächster Nähe vorhanden sind.

Als entscheidender und letzter Schritt der Standortauswahl erfolgte die anschließende Bestimmung einer realen Fläche als Potenzialgebiet. Zu diesem Zweck konnten weitere wesentliche und dem Kriterienkatalog gerecht werdende Parameter, in einer planungsgerechten Maßstäblichkeit, untersucht und die Fläche eingegrenzt werden. Infolgedessen stellte sich eine Fläche von ca. 5,2 ha heraus (siehe Abbildung 29, S. 60). Dabei handelt es sich um eine, durch Ackerwirtschaft genutzte Fläche bestehend aus drei Flurstücken. Das Gebiet wurde so begrenzt, dass es nicht an den südlich liegenden Siedlungsteil angrenzt, da die Anlage sonst als möglicher Störfaktor wahr genommen werden könnte. Trotzdem verbleibt eine ausreichende Flächengröße, welche die Positionen der Wirtschaftlichkeit und Möglichkeiten für biodiversitätsfördernde

Strukturen eint. Unter Hinzunahme der Ackerwertzahl vom *Geoportal Thüringen* erfüllt die Fläche mit 35 ein weiteres Kriterium, da diese unter 40 bleibt und der Boden dementsprechend keine hohe Ertragsrate hat. Ca. 400m in westlicher Richtung wird die Umgebung von einer Bahntrasse gequert, was den Vorteil einer eventuellen EEG-Förderung innerhalb des 500m-Korridors mit sich bringen kann. Des Weiteren schließt sich in der selben Richtung eine PV-Anlage innerhalb eines Industriegebietes an. Unter diesem Gesichtspunkt kann die Einspeisung des Stroms über diese bereits gebaute Netz-Infrastruktur erfolgen, was das Einhalten der Transformatornähe mit sich bringt. Gesamtheitlich liegt die Fläche topografisch gesehen auf einer Ebene bzw. in einer Art leichten Senke. Insofern kann eine optimale Modulausrichtung in Richtung Süd- Süd-Osten erfolgen und eine hohe Effizienz erzielt werden.

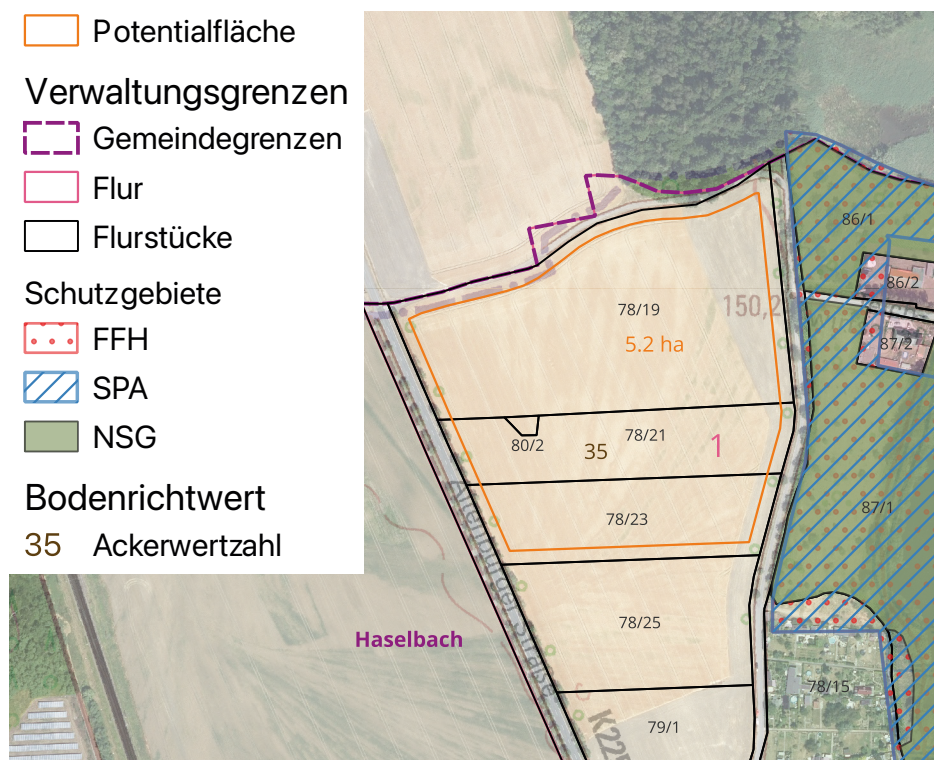


Abbildung 29: Endgültiges Herausstellen der Potenzialfläche als Planungsgebiet unter Berücksichtigung weiterer Parameter
(Quelle: eigene Abbildung)

7.2 Ausblick der Biodiversitäts-Freiflächenanlage

Anhand der zuvor erläuterten Phase der Flächenauswahl und der damit verbundenen Aufschlüsselung der angewandten Methode wurde das grundsätzliche Verfahrensprinzip erläutert. Die hinzugezogenen und

angewandten Maßnahmen werden während des Prozesses in der Kreislaufübersicht abgehakt (siehe Abbildung 30). Wird mit der Methodik auf diese Art und Weise über alle Phasen hinweg weiter verfahren, kann ein schneller und aussagekräftiger Überblick über die Anzahl der wahrgenommenen Maßnahmenvorschläge gewonnen werden.

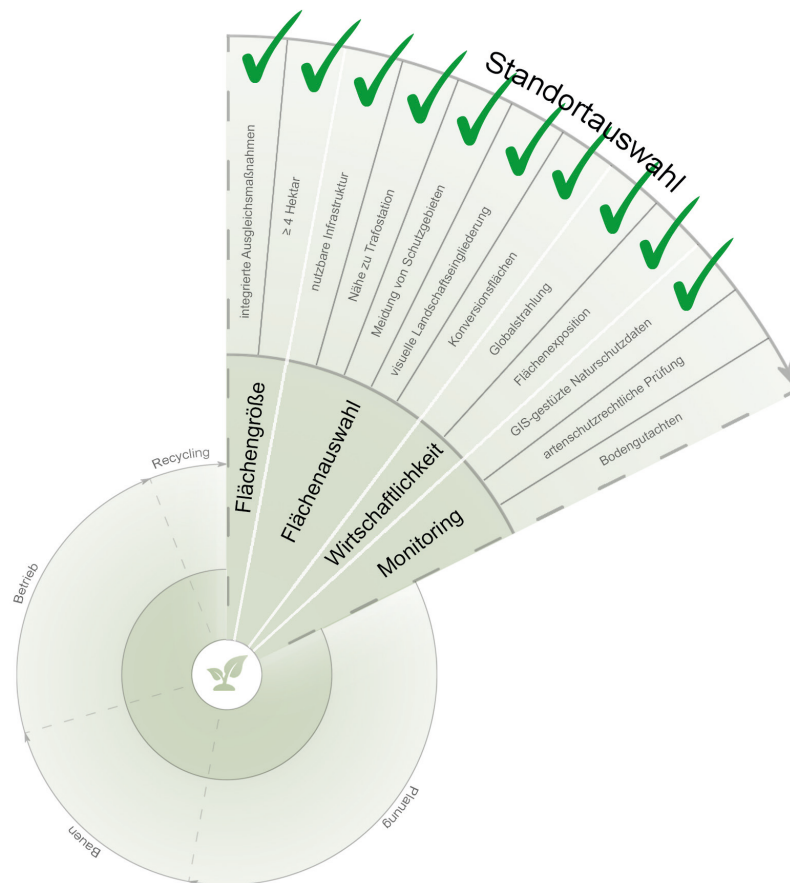


Abbildung 30: Umsetzung des Kriterienkatalogs anhand der ersten Phase Standortauswahl
(Quelle: eigene Abbildung)

8. Diskussion

Dieses Kapitel beinhaltet eine kritische Reflexion der zugrunde liegenden Forschungsmethode, ihrer Ergebnisse und dem daraus folgenden Kriterienkatalog.

Die Erkenntnisse und der gewonnene sowie übermittelte Wissensstand wird als weitreichend, umfassend aber, nicht allumfänglich betrachtet. Die Literatursauswahl, für die Meta-Analyse ähnliche Methodik erfolgte dabei, wie

im Kapitel 5.1 Literatursauswahl, beschrieben. Die bereits angesprochene Heterogenität innerhalb der Analyse ist dabei ein Kernfaktor. Demnach wurde die Auswahl als globale und interdisziplinäre Disziplin betrachtet. Dies bringt jedoch gleichermaßen verschiedenen Standortfaktoren und klimatische Bedingungen mit sich, sodass übermittelte Forschungserkenntnisse nicht zu gleichen Teilen auf jedes Szenario übertragbar sind.

Unter Berücksichtigung der genannten Suchdienste und Schlagwörter konnte der Großteil essenzieller Literatur mit speziellem Bezug zur Thematik auf internationaler Ebene gefiltert werden. Die Gesamtauswahl der Literatur bietet allerdings ein noch höheres Potenzial für das Zusammentragen von Wissensständen und Ergebnissen der letzten Jahre. Im Rahmen der Arbeit und der speziellen Thematik wird die Selektierung als ausreichend betrachtet, sodass über das thematische Basiswissen hinaus beleuchtet werden konnte.

Durch die entstandene Bewertungsmatrix, bestehend aus genannten Kategorien, wurde eine fundamentale Grundlage für die spätere Auswertung gelegt. Die anschließende Bewertung nach dem aufgestellten Codierungssystem unterliegt jedoch mehr oder weniger einer Vergleichsgrundlage der analysierten Literatur. Hierfür gibt es kein allgemeingültiges Bewertungssystem, was besagt, inwiefern welche Auswirkungen einer Anlage zu welchem Grad bemessen werden. Die Zuordnung erfolgte demzufolge nach bestem Wissen und Gewissen sowie einem logischen überblickenden Schlussfolgern der gesamten Bewertungsmatrix.

Ähnliches spiegelt sich bei der zugeteilten Effektstärke wider. Die Bedeutsamkeit der einzelnen Publikationen beruht ebenfalls auf einer Art Vergleichssystem. Anhand der angewandten Methoden wurde sich demzufolge für eine 5-stufige Skala entschieden, bei welcher jede Stufe einen Faktor bildet. Wird unter diesem Prinzip eine mit *gut* und der Effektstärke 4 bewertete Studie mit einer *äußerst schlecht* und der Effektstärke 2 verglichen, relativieren sich diese in der gesamtheitlichen Auswertung durch die Bewertungsstufen 4 und -4. Das Prinzip ist hierbei zwar annähernd valide, muss aber fallspezifisch kritisch

betrachtet werden. Ohnehin gilt die fallspezifische Betrachtung eines jeden Forschungsprojektes.

Die Auswertung der untersuchten Organismengruppen bietet die Möglichkeit weitreichender Aufschlüsselungen. So empfiehlt es sich beispielsweise bei Bestäubern in Wildbienen und Schmetterlinge zu untergliedern, da diese oft separierte Forschungsgrundlagen haben. Im Zuge der Förderungsmaßnahmen wurde eine zusammenfassende Darstellung als hinreichend angesehen.

Globale Auswirkungen hinsichtlich der Herstellungsprozesse von PV-Modulen konnten in der Arbeit nicht mit einbezogen werden. Die benötigten Rohstoffe werden oftmals in dritte Welt Ländern abgebaut und sind mit menschenrechtlichen und ökologischen Ausbeutungsproblemen verbunden.

Die ausgearbeitete Handlungsempfehlung mit Kriterienkatalog basiert auf dem gesamtheitlich zusammengetragenen Wissen, welches im Vorfeld und explizit durch die Literaturanalyse gewonnen wurde. Sämtliche Maßnahmenvorschläge unterliegen demnach einer Grundlage. Trotzdem beruhen die Ergebnisse nicht auf empirisch ermittelten Daten. Die Planung und der Bau einer PV-FFA ist dabei stets fallspezifisch zu betrachten und kann durch entsprechende Maßnahmen ergänzt werden. Es ist förderlich die einzelnen Phasen beizubehalten, da diese eine logische Aufgliederung der Abfolge darstellen.

Das Erreichen von 75% der vorgeschlagenen Maßnahmen, zum Erhalt des Biodiversitätssiegels, unterliegt der theoretischen Annahme einer realistischen Umsetzbarkeit mit ausreichenden Auswirkungen zur Biodiversitätsförderung. Eine tatsächliche Umsetzbarkeit und die realen Auswirkungen infolgedessen muss jedoch zwingend anhand von verschiedenen Anwendungsprojekten evaluiert und gegebenenfalls angepasst werden.

Alle Handlungsempfehlungen des Kriterienkatalogs bedürfen einer genaueren Ausformulierung mit klar definierten Inhalten und Methoden, um als DIN SPEC umgesetzt zu werden. Die hier ausgearbeiteten Handlungsstränge sollen

dabei eine adäquate Grundlage bieten, können aber unter Hinzunahme bereits bestehender Leitfäden detaillierter ausdefiniert werden.

Bei der Aufstellung des Maßnahmenkatalogs wurden keine kostenbasierenden Faktoren einbezogen. Hierbei geht es prinzipiell um die Möglichkeiten der Aufwertung von Biodiversitätsstrukturen, unter der Erzeugung von nachhaltigem Strom durch PV-FFA. Eine Vielzahl dieser sind dabei nach Ansicht des Autors auf, ins Verhältnis gesetztem kostengünstigen Wege umsetzbar. Positionen wie die Aufstellung eines langfristigen Pflegemanagementplans beispielsweise, sollten hierbei jedoch im Vorfeld genauer eruiert werden.

Da eine fortwährende Entwicklung der Natur und Umwelt nie genau prognostiziert werden kann und ständigen Veränderungen unterliegt, ist ein expliziter Ausblick diesbezüglich nicht möglich. Wie bereits beschrieben, besteht hier die Notwendigkeit einer Bereitstellung von Pilotprojekten für Begleitforschungen, um zukünftige Maßnahmen noch weiter zu verbessern.

9. Fazit

Unter Beantwortung der drei zentralen Fragestellungen, welche der vorliegenden Arbeit zugrunde liegen, soll das gewonnene und vermittelte Wissen im folgenden Kapitel abschließend zusammengefasst werden. Mit Berücksichtigung der Ergebnisse erfolgt ein zukunftsweisender Ausblick über Notwendigkeiten zur weiteren Förderung von Synergien durch PV-FFA und Biodiversitätsstrukturen.

Für eine zukunftsfähige und ausreichende Energiegewinnung im Versorgungsmaßstab besteht die dringende Notwendigkeit der Implementierung der PV, als ganzheitliche und wertvolle Alternative zu fossilen Brennstoffen. Dabei kann sie neben anderen Energieformen wie beispielsweise der Windenergie zur maßgeblichen Eindämmung des globalen Temperaturanstiegs beitragen. Als Grundlage für eine Vielzahl alltagsprägender Bereiche wie Wärmeversorgung und Mobilität, kommt dem Stromsektor eine gesteigerte Bedeutung zu. Auf Grund von weltpolitischen Aktualitäten, wie der russische Angriffskrieg, ist die Unabhängigkeit von fossilen Brennstoffen umso wichtiger. Das Potenzial von

Solarstrom wird dank einem 10 bis 53mal geringerem CO₂-Äquivalent/kWh im Vergleich zur Verbrennung von Öl deutlich. Durch die Notwendigkeit der globalen Energietransformation werden Forschungen im Bereich Erneuerbarer Energien stetig voran getrieben, was die Tendenz der Wirksamkeit weiter steigern wird. Das in Deutschland erklärte Ziel der Treibhausgasneutralität bis 2045 ist nur durch die Anwendung der weitreichenden Bandbreite an PV-Nutzungsmöglichkeiten wie Dachanlagen, Freiflächenanlagen oder neuartigen Technologien wie Moor-PV, Agri-PV und Floating-PV zu erreichen. Hierbei besteht ein gesamtheitliches technisches Potenzial von 4600 GWp. Im Hinblick auf die, durch das EEG 2023 festgesetzten Ausbauziele, muss dieses Potenzial mit einer Verdreifachung der bisherigen Leistung genutzt werden. Die Technologie der genehmigungspflichtigen, aufgeständerten und ebenerdigen Freiflächen-Anlagen stellt dabei einen signifikanten Schlüsselfaktor dar. PV-FFA produzieren dabei Strom bezogen auf ihre Modulfläche und liegen bei einem derzeitigen Flächenbedarf von ca. 1 - 1,5 ha für 1 MW Strom. Mit einer positiven Prognose für die kommenden Jahre bringt dies eine hohe Flächeneffizienz mit sich. Der angestrebte Zuwachs ist gleichzeitig mit einem hohen Freiflächenbedarf verbunden. Dies stellt stets einen Eingriff in die Natur und Umwelt dar und zieht, durch die Flächennutzungskonkurrenz eine gewisse Kontroverse zwischen nachhaltig produziertem Strom und Naturschutz mit sich. Durch entsprechende Ausgestaltungen der Anlagen und der Eingliederung in die Landschaft kann dem Effekt jedoch entgegengewirkt werden und eine positive Förderung für Flora und Fauna, im Rahmen einer Flächendoppelnutzung erreicht werden. Dabei soll das standortentsprechende Ökosystem durch integrierte Maßnahmen und Strukturvielfältigkeit unterstützt und verbessert werden. Durch Ständersysteme ist der baulich bedingte Flächenbedarf, bei einer wirtschaftlichen Betriebsform ab einer Flächengröße von 2 ha, ohnehin weitestgehend gering. Eine hohe Lebensdauer und lang anhaltende Erträge erklären u.a. die niedrigen Stromgestehungskosten im Vergleich zu anderen Energieerzeugungsformen. Zusätzlich gibt es Möglichkeiten von 20-jährigen Förderungszeiträumen nach EEG 2023, welche in Einspeisevergütung, Marktprämie oder Ausschreibung gegliedert sind. Nach Ablauf dieser kann eine lukrative Erhaltung von PV-FFA durch Power Purchase Agreements angestrebt

werden. So bleiben die Anlagen bestehen, produzieren fortlaufend Strom und rufen keinen weiteren Eingriff hervor. Dies kann maßgeblich zur Erreichung der Klimaziele beitragen und eine dem Versorgungsmaßstab gerecht werdende Stromversorgung gewährleisten. Im Rahmen der Arbeit wurden die, für die Biodiversität maßgebenden Organismengruppen Flora, Avifauna, Säugetiere, Bestäuber, Reptilien, Amphibien und Sonstige wie z.B. Arthropoden betrachtet. Die Vielfalt der Artzusammensetzungen erzielen dabei verschiedene Wirkungen auf Ökosysteme und bestimmen somit den Grad der Ökosystemdienstleistung. Allein die Bestäuberleistung in Deutschland wird dabei auf einen Wert von ca. 3,8 Milliarden Euro geschätzt. Als Bestand und Gesamtheit aller Pflanzengesellschaften bietet die Flora hier die Grundlage. Die vorliegende Literaturanalyse bezog sich auf internationale Forschungen in deutscher und englischer Sprache über acht Länder hinweg. Die hohe Heterogenität dieser Methode schließt gleichzeitig eine Vielzahl an Standortbedingungen und Artzusammensetzungen ein. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf dem Anlagentyp der Freiflächen-Photovoltaik. Nach umfassender Recherche und Konsultierung verschiedener Suchdienste wurden 31 referierte wissenschaftliche Paper, 5 Studien und 7 Projektberichte zur Auswertung gezogen. Durch die Erstellung einer Datenmatrix konnte ein einheitlicher Datensatz generiert werden, mit dem Ziel einer anschließenden Bewertung der Literatur nach eigens erstelltem Codierungssystem. Die Forschungsergebnisse wurden dementsprechend nach ihren Erkenntnissen bezüglich sämtlicher Auswirkungen von untersuchten PV-Anlagen oder Modellrechnungen auf die Biodiversität eingeordnet. Unter Hinzunahme einer Effektstärke, dienend als Faktor für die grundlegende Bewertung, wurde die Literatur anschließend nach ihrer Aussagekraft und Bedeutsamkeit gegliedert. Mit einem Peak von 13 Arbeiten aus dem Jahr 2020 erreicht der allgemein steigende Trend den Höhepunkt der letzten 10 Jahre und unterstreicht die immer stärker aufkommende Relevanz. Dabei stellt die Flora die meistbetrachtete Organismusgruppe in 16 Arbeiten dar. In absteigender Reihenfolge kommen anschließend die Avifauna, Bestäuber, Säugetiere, Sonstige, Reptilien und Amphibien. Durch die Auswertung der grundlegenden Bewertungscodierung lässt sich ein deutlich positives Forschungsbild erkennen. Gestützt wird dies durch die Aktualität der Forschungsmethoden und

Auswirkungen, da der Großteil der mit *gut* bewerteten Literatur aus den letzten drei Jahren stammt.

Insgesamt treffen 18 Publikationen ein positives Fazit, wohingegen sieben Arbeiten ein negatives Resümee ziehen. Als Gründe für die Negativbewertung werden dabei vor allem Fragmentierungen und Verdrängungseffekte aufgezeigt. Dem kann durch entsprechende Maßnahmen Einhalt geboten werden, was eine Vielzahl von positiv bewerteten Texten zeigt. Hier wurden bereits biodiversitätsfördernde Maßnahmen integriert und die Auswirkungen untersucht. Unter diesem Gesichtspunkt kann die zweite Forschungsfrage durch eine Mehrheit von positiven Biodiversitätsentwicklungen in bereits bestehenden PV-FFA bestätigt werden. Insbesondere in Agrarlandschaften kann die Verbesserung der Biodiversität von hohem ökologischen Nutzen sein, was PV-Anlagen unter Beherrschung heimischer Arten zu einem Teil der grünen Infrastruktur werden lassen. Das grundsätzlich positive Meinungsbild wird unter Hinzunahme der Effektstärke unterstützt und bestätigt. Mit einem Peak von 8, bei einer möglichen Maximalbewertung von 10 und einem überwiegenden Trend von 6 kommen dem Positivsektor überwiegend hohe Effektstärken, hervorgerufen durch das weitgehend große Forschungsengagement, zu. Eine deutlich zu steigernde Relevanz des Themas Forschungsbedarf wird dahingehend jedoch durch die Auswertung eingebundener Handlungsempfehlungen bzw. Maßnahmen deutlich. Im Vergleich zu 25 Arbeiten, welche keine konkreten Maßnahmen nennen, stehen 18 Arbeiten mit Ansprachen oder Umsetzungen von Handlungsempfehlungen. Auffällig häufig werden dabei beispielsweise notwendige Abstände der Modulreihen und die Integration vegetativer Strukturelemente behandelt. Bereits gewonnene Erkenntnisse über die Auswirkungen von biodiversitätsfördernden Maßnahmen dienen als Grundlage für den anschließend ausgearbeiteten Kriterienkatalog, welcher gleichzeitig zur Beantwortung der dritten Forschungsfrage dient. Hierzu wurde ein 5-stufiges Kreislaufsystem entwickelt, welches die übergeordneten Phasen Standortauswahl, Planung, Bau, Betrieb und Recycling beinhaltet. Ziel der Handlungsempfehlung war die Entwicklung eines Leitfadens, welcher die Wirtschaftlichkeit einer Freiflächen-Anlage mit der Verbesserung des IST-Zustandes aus naturschutzfachlicher Perspektive vereint. Hierzu wurden die Phasen über zwei Ebenen aufgeschlüsselt und insgesamt

68 Maßnahmenvorschläge, welche in eine PV-FFA integriert werden können, gelistet. Beim Erreichen einer Mindestanzahl von 75% der Maßnahmen, unter Beachtung jeder Kategorie der ersten Ebene, ist der Erhalt eines Biodiversitäts-Siegels vorstellbar. Über weitere Forschungs- und Anwendungsprojekte kann darauf aufbauend eine DIN SPEC ausgearbeitet und entwickelt werden. Durch das abschließende Anwendungsbeispiel wird die Validität der Methode bestätigt und aufgezeigt, was es zur Umsetzung einer Biodiversitäts-Freiflächenanlage bedarf.

Zur Bestätigung der bisherigen Untersuchungsergebnisse sind zwingend weitere Studien und Erkenntnisse von einer Vielzahl an PV-FFA und ihrer Auswirkungen auf den Naturhaushalt notwendig. Dabei sollten Pilotprojekte zum Tragen kommen, welche unterschiedliche Maßnahmen unter verschiedenen Standortbedingungen integrieren. Im Rahmen groß angelegter und über einen langen Zeitraum hinweg stattfindender Begleitforschungen muss, durch stetige Anpassungen auf Veränderungen des Ökosystems reagiert werden, um so bestmögliche Wirkfaktoren zu erarbeiten bzw. weiterzuentwickeln.

Literaturverzeichnis

- Agentur für Erneuerbare Energien e.V. (2019): Die Verknüpfung von Strom, Wärme und Verkehr im Energiesystem der Zukunft. Abgerufen am: 23.07.23. Verfügbar unter: <https://www.unendlich-viel-energie.de/themen/verkehr/die-verknuepfung-von-strom-waerme-und-verkehr-im-energie-system-der-zukunft>.
- Agha M., Lovich J. E., Ennen J. R. & Todd B. D. (2020): Wild, sun, and wildlife: do wind and solar energy development 'short-circuit' conservation in the western United States?. Abgerufen am: 07.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8846>.
- Ammermann K., Bunzel K. & Igel F. (2022): Eckpunkte für einen naturverträglichen Ausbau der Solarenergie. Bonn: Bundesamt für Naturschutz (bfn).
- Armstrong A., Ostle N. J. & Whitaker J. (2016): Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/7/074016>.
- Armstrong J.H., Kulikowski A.J. & Philpott S.M. (2020): Urban renewable energy and ecosystems: integrating vegetation with ground-mounted solar arrays increases arthropod abundance of key functional groups. Zugriff am: 03.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1007/s11252-020-01063-6>.
- Babayigit A., Thanh D. D., Ethirajan A., Manca J., Muller M., Boyen H.-G. & Conings Bert (2016): Assessing the toxicity of Pb- and Sn- based perovskite solar cells in model organism *Danio rerio*. Abgerufen am: 04.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/srep18721>.
- Badelt O., Niepelt R., Wiehe J., Matthies S., Gewohn T., Stratmann M., Brendel R. & von Haaren C. (2020): Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE). Hannover: 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. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/srep35070>.
- Beatty B., Macknick J., McCall J. & Braus G. (2017): Native Vegetation Performance under a Solar PV Array at the National Wind Technology Center. Golden: National Renewable Energy Laboratory.

- Blaydes H., Potts S.G., Whyatt J.D. & Armstrong A. (2021): Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. Abgerufen am: 06.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111065>.
- BUND für Umwelt und Naturschutz in Bayern e.V. (2022): BN-Position Photovoltaik-Anlagen. Regensburg: BUND für Umwelt und Naturschutz in Bayern e.V..
- Bundesamt für Naturschutz (2021): Rote Liste der Tiere, Pflanzen, und Pilze Deutschlands - Amphibien. BfN: Naturschutz und Biologische Vielfalt Heft 170 Bd. 4.
- Bundesamt für Naturschutz (2021): Rote Liste der Tiere, Pflanzen, und Pilze Deutschlands - Reptilien. BfN: Naturschutz und Biologische Vielfalt Heft 170 Bd. 3.
- Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (2023): Photovoltaik-Strategie Handlungsfelder und Maßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der Photovoltaik. Berlin: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (2023): Energie und Klima. Abgerufen am: 23.07.23. Verfügbar unter: <https://www.bmz.de/de/themen/klimawandel-und-entwicklung/energie-und-klima>.
- Bundesnetzagentur (2023): Solaranlagen des ersten Segments. Bonn: Bundesnetzagentur, Referat 625 - Ausschreibung.
- Bundesverband Neue Energiewirtschaft (bne) e.V. (2021): Geo-Tag der Natur (2021): Biodiversität in Solarparks. Berlin: Bundesverband Neue Energiewirtschaft (bne) e.V..
- Bundesverband Neue Energiewirtschaft (bne) e.V. (2022): Gute Planung von PV-Freiflächenanlagen. Berlin: Bundesverband Neue Energiewirtschaft (bne) e.V..
- Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (2022): PV-Förderung im EEG 2023. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V..
- Centrales Agrar-Rohstoff Marketing- und Energie-Netzwerk (2023): Freiflächen-Photovoltaikanlagen, Leitfaden. Straubing: C.A.R.M.E.N. e.V..

Chock R. Y., Clucas B., Peterson E. K., Blackwell B. F., Blumstein D. T., Church K., Fernandez-Juricic E., Francescoli G., Greggor A. L., Kemp P., Pinho G. M., Sanzenbacher P. M., Schulte B. A. & Toni P. (2020): Evaluating potential effects of solar power facilities on wildlife from an animal behavior perspective. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1111/csp2.319>.

Choi C. S., Cagle A. E., Macknick J., Bloom D. E., Caplan J. & Sujith R. (2020): Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00140>.

DaNa (2023): Informationen zur Sicherheit von neuen, innovativen Materialien und Nanomaterialien. Abgerufen am: 27.06.23. Verfügbar unter: <https://nanopartikel.info/wissen/materialien/siliziumdioxid/>.

Deutsche Bundesstiftung Umwelt (dbu) (2020): 10.000. DBU-Projekt vereint Artenschutz und Energiewende. Abgerufen am: 23.06.2023. Verfügbar unter: <https://idw-online.de/de/news?print=1&id=748849>.

Deutscher Wetterdienst (DWD): Globalstrahlung. Abgerufen am: 28.08.2023. Verfügbar unter: https://www.dwd.de/DE/leistungen/fernerkund_globalstrahlung_sis/fernerkund_globalstrahlung_sis.html.

Deutsches Institut für Normung e.V. (2023): Wie eine DIN SPEC entsteht. Abgerufen am: 20.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/din-spec/wie-eine-din-spec-entsteht-63574>.

Dhar A., Naeth M. A., Jennings P. D. & El-Din M. G. (2019): Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. Abgerufen am 05.07.2022. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134602>.

Die Bundesregierung (2023): Ausbau erneuerbarer Energien massiv beschleunigen. Abgerufen am: 01.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/schwerpunkte/klimaschutz/novelle-eeg-gesetz-2023-2023972>.

EIGENSONNE (2023): Einspeisevergütung 2023: Wie viel bekommst Du für Deinen Strom? Abgerufen am: 03.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.eigensonne.de/ratgeber/photovoltaik/einspeiseverguetung/>.

esri Deutschland (o.J.): Was ist GIS?. Abgerufen am: 27.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.esri.de/de-de/was-ist-gis/uebersicht>.

- Fischer T., Ebner A., Battaglia M., Dr. Ehrig R., Petersen A., Pechir B. H. (2019): Corporate Green PPAs Umfrage zu Perspektiven nachfragegetriebener Stromlieferverträge bis 2030. Berlin: Deutsche Energie-Agentur GmbH (dena).
- Franz M. (2023): Entwicklung des Landesverbrauchs von Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Europa. Wien: TU Wien, Institut für Sensor- und Aktuatorssysteme.
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE (2023): Photovoltaik auf wiedervernässten Moorböden. Abgerufen am: 01.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.ise.fraunhofer.de/de/leitthemen/integrierte-photovoltaik/moor-pv.html>.
- 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. Abgerufen am: 06.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4>.
- Greif S., Zsebok S., Schmieder D. & Siemers B. M. (2017): Acoustic mirrors as sensory traps for bats. Abgerufen am: 30.06.2023. Verfügbar unter: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.aam7817>.
- Günnewig D., Johannwerner E., Metzger J., Kelm T. & Wegner N. (2022): Umweltverträgliche Standortsteuerung von Solar-Freiflächenanlagen Handlungsempfehlung für die Regional- und Kommunalplanung. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
- Hartmann T. & Seeger R. M. (2020): Photovoltaik auf Stillgewässern Eine Untersuchung der Potentiale in Thüringen. Erfurt: FH Erfurt.
- Hassenpour A. E., Selker JS. & Higgins CW. (2018): Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. Oregon: Department of Biological and Ecological Engineering.
- Hengstler J., Russ M., Stoffregen A., Hendrich A., Weidner S., Dr. Held M., Briem A.-K. (2021): Aktualisierung und Bewertung der Ökobilanzen von Windenergie- und Photovoltaikanlagen unter Berücksichtigung aktueller Technologieentwicklungen. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

- Hietel E., Lenz C. & Schnaubelt H.L. (2021) Untersuchungsbericht zum Forschungsprojekt „Wissenschaftliche Untersuchungen zur Entwicklung eines Modellkonzepts für naturverträgliche und biodiversitätsfreundliche Solarparks“. Abgerufen am: 06.07.2023. Verfügbar unter: über die Hochschule Bingen.
- Hietel E., Reichling T. & Lenz C. (2021): Leitfaden für naturverträgliche und biodiversitätsfreundliche Solarparks – Maßnahmensteckbriefe und Checklisten. Abgerufen: 28.08.2023. Verfügbar unter: über die Hochschule Bingen.
- Illinois Department of Natural Resources (2019): Solar Site Pollinator Establishment Guidelines. Illinois: Illinois Department of Natural Resources.
- Janßen K. (2023): Bifaziale Module: Vor- und Nachteile, Ertrag, Kosten (2023). Abgerufen am: 01.08.2023. Verfügbar unter: <https://gruenes.haus/bifaziale-solarzellen/>.
- Jeal C., Perold V., Seymour C. L., Ralston-Paton S. & Ryan P. G. (2019): Utility-scale solar energy facilities – Effects on invertebrates in an arid environment. Abgerufen am: 07.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.05.008>.
- Kannenbergh S. A., Sturchio M. A., Venturas M. D. & Knapp A. K. (2023): Grassland carbon-water cycling is minimally impacted by a photovoltaic array. Abgerufen am: 11.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00904-4>.
- Kaphegyi, T. (2002): Untersuchungen zum Sozialverhalten des Rotfuchses (*Vulpes vulpes* L.). Freiburg im Breisgau: Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Brsg.
- 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. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146475>.
- Kosciuch K., Riser-Espinoza D., Gerringer M. & Erickson W. (2020): A summary of bird mortality at photovoltaic utility scale solar facilities in the Southwestern U.S.. Abgerufen am: 04.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232034>.

Kost C., Shammugam S., Fluri V., Peper D., Memar A. D. & Schlegl T. (2021): Stromgestehungskosten Erneuerbare Energien. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.

Lammerant L., Laureysens I. & 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 Project: "Reviewing and mitigating the impacts of renewable energy developments on habitats and species protected under the Birds and Habitats Directives", Arcadis Belgium, Institute for European Environmental Policy, BirdLife International, NIRAS, Stella Consulting, Ecosystems Ltd, Brussels.

Land.belebt (o.J.): Artenschutz unter Strom. Bodenkirchen: Land.belebt.

Lieder K. & Lumpe J. (2011): Vögel im Solarpark – eine Chance für den Artenschutz? Auswertung einer Untersuchung im Solarpark Ronneburg „Süd I“. Ronneburg & Greiz: NABU.

Lippert C., Feuerbach A., Narjes M. (2021) Revisiting the economic valuation of agricultural losses due to large-scale changes in pollinator populations. Stuttgart: Universität Hohenheim.

Makaronidou M. (2020): Assessment on the local climate effects of solar parks. Lancaster: Lancaster University.

Max Planck Gesellschaft (2023): Biodiversität - Vielfalt des Lebens. Abgerufen am: 27.07.2023. Verfügbar unter: <https://www.mpg.de/biodiversitaet>.

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. Abgerufen am: 10.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.2317/0022-8567-92.2.468>.

Montag H., Dr. Parker G. & Clarkson T. (2016): The Effects of Solar Farms on Local Biodiversity; A Comparative Study. Blackford: 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., Kreidler J. & Lovich J. E. (2017): Sustainability of utility-scale solar energy – critical ecological concepts. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1002/fee.1517>.

NABU (2022): Solarparks naturverträglich ausbauen. Anforderungen des NABU an naturverträgliche Photovoltaik- Freiflächenanlagen. Berlin: NABU.

- NABU (o.J.): Amphibien und Reptilien. Artenporträts, Gefährdungen und Schutzmaßnahmen. Abgerufen am: 28.07.2023. Verfügbar unter: <https://www.nabu.de/tiere-und-pflanzen/amphibien-und-reptilien/index.html>.
- NABU (o.J.): Kleine Tierchen mit großer Leistung Warum Insektenbestäubung lebenswichtig ist. Abgerufen am: 27.07.2023. Verfügbar unter: <https://www.nabu.de/tiere-und-pflanzen/insekten-und-spinnen/info/22683.html>.
- NABU und BSW Solar (2021): Kriterien für naturverträgliche Photovoltaik-Freiflächenanlagen, Gemeinsames Papier. verfügbar auf: https://helioaia.de/Kollektoranlagen_und_Naturschutz_mit_Text_Markierungen____210428_NABU-BSW-Papier-1.pdf. abgerufen am: 19.04.2023.
- Northrup J. M. & Wittemyer G. (2013): Characterising the impacts of emerging energy development on wildlife, with an eye towards mitigation. Colorado: Department of Fish, Wildlife and Conservation Biology (State University).
- Peschel R., Dr. Peschel T., Dr. Marchand M. & Hauke J. (2019): Solarparks – Gewinne für die Biodiversität. Berlin: Bunderverband Neue Energiewirtschaft (bne) e.V..
- Peschel T. & Peschel R. (2023): Photovoltaik und Biodiversität – Integration statt Segregation!. Stuttgart: Naturschutz und Landschaftsplanung, Verlag Eugen Ulmer.
- Photovoltaik.one (2022): Agri- oder Agrophotovoltaik – schnell und einfach erklärt!. Abgerufen am: 23.06.2023. Verfügbar unter: <https://photovoltaik.one/agrophotovoltaik>.
- pv magazine (2023): Freiflächensolar: Die neue Privilegierung für PV - Bedeutung und Auswirkung. Abgerufen am: 22.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.pv-magazine.de/termine/freiflaechensolar-die-neue-privilegierung-fuer-pv-bedeutung-und-auswirkungen/>.
- pv magazine (2023): Module. Berlin: pv magazine group GmbH & Co. KG.
- Quaschnig V. (2021): Erneuerbare Energien und Klimaschutz. München: Carl Hanser Verlag.
- Raab, B. (2015): Erneuerbare Energien und Naturschutz – Solarparks können einen Beitrag zur Stabilisierung der biologischen Vielfalt leisten. Laufen: ANLiegen Natur.

- Schlegel J., Hintz W., Rohrer J., Rupf R. & Stickelberger D. (2021): Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt. Ittigen: EnergieSchweiz.
- Schultz J. (2019): Was ist eigentlich Peer-Review?. Abgerufen am: 04.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.citavi.com/de/nuetzliche-irrtuemer/artikel/was-ist-eigentlich-peer-review>.
- Semeraro T., Aretano R., Barca A., Pomes A., Giudice C. D., Gatto E., Lenucci M., Buccolieri R., Emmanuel R., Gao Z. & Scognamiglio A. (2020): A Conceptual Framework to Design Green Infrastructure: Ecosystem Services as an Opportunity for Creating Shared Value in Ground Photovoltaic Systems. Lecce: Department of Biological and Environmental Sciences and Technologies.
- Semeraro T., Pomes A., Giudice C. D., Negro D. & Aretano R. (2018): Planning ground bases utility scale solar energy as green infrastructure to enhance ecosystem services. Abgerufen am: 04.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.050>.
- Sinha P., Hoffman B., Sakers J. & Althouse L. (2018): Best Practices in Responsible Land Use for Improving Biodiversity at a Utility-Scale Solar Facility. Abgerufen am: 06.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1525/cse.2018.001123>.
- SL Rack Schletter Ludwig (2022): Datenblatt zu Freiflächensystemen. Abgerufen am: 01.08.2023. Verfügbar unter: https://www.sl-rack.com/wp-content/uploads/2021/04/SL_Rack_Freiflaechensystem_Prodktblatt_DE.pdf.
- Solarenergie.de (2023): Nachgeführte PV-Anlagen. Abgerufen am: 01.08.2023. Verfügbar unter: <https://solarenergie.de/photovoltaikanlage/arten-von-pv-anlagen/nachgefuehrte-pv-anlagen>.
- Solarenergie.de (2023): Photovoltaik auf Freiflächen. Abgerufen am: 14.07.2023. Verfügbar unter: <https://solarenergie.de/photovoltaikanlage/arten-von-pv-anlagen/photovoltaik-freiflaechenanlagen>.
- Stiftung Umweltenergierecht (2022): Steuerung des PV-Asubaus, Viel Klein-Klein bei der förderrechtlichen Steuerung der PV auf der Freifläche. ABgerufen am 05.08.2023. Verfügbar unter: <https://stiftung-umweltenergierecht.de/e-letter/e-letter-september-2022/pv/>.

- Tanner K., Molina-Menor E., Latorre-Perez A., Vidal-Verdu A., Vilanova C., Pereto J. & Porcar M. (2020): Extremophilic microbial communities on photovoltaic panel surfaces: a two year study. Abgerufen am: 07.07.2023. Verfügbar unter: <https://ami-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/1751-7915.13620>.
- Tawalbeh M., Al-Othman A., Kafiah F., Abdelsalam E., Almomani F. & Alkasrawi M. (2020): Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. Abgerufen am: 12.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528>.
- Taylor R., Conway J., Gabb J. O. & Gillespie J. (2019): Potential ecological impacts of ground-mounted photovoltaic solar panels. BSG ecology: Newport.
- Tröltzsch P. & Neuling E. (2013): Die Brutvögel großflächiger Photovoltaikanlagen in Brandenburg. Vogelwelt 134: 155-179.
- 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. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2021.106274>.
- Umweltbundesamt (2021): Übereinkommen von Paris. Abgerufen am: 14.07.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/internationale-eu-klimapolitik/uebereinkommen-von-paris#ziele-des-ubereinkommens-von-paris-uvp>.
- Umweltbundesamt (2023): Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft. Abgerufen am: 14.07.2023. Verfügbar unter: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#bedeutung-von-landnutzung-und-forstwirtschaft>.
- Universität Leipzig (o.J.). Durchführung der Analyse. Zugriff am: 29.06.2023. Verfügbar unter <https://home.uni-leipzig.de/methodenportal/durchfuehrung-der-analyse/>.
- Verwaltungsgemeinschaft Pleißenau (o.J.): Haselbach. Verfügbar unter: <https://www.vg-pleissenaue.de/mitgliedsgemeinden/haselbach.html>. Abgerufen am: 29.08.2023.

- Victoria M., Haegel N., Peters I. M., Sinton R., Jäger-Waldau A., Cañ C., Breyer C., Stocks M., Blakers A., Kaizuka, I., Komoto K. & Smets, A. (2021). Solar photovoltaics is ready to power a sustainable future. *Joule*. 5. 10.1016/j.joule.2021.03.005.
- Visser E., Perold V., Ralston-Paton S., Cardenal A. C. & Ryan P. G. (2018): Assesing the impacts of a utility-scale photovoltaic solar energy facility on birds in the Northern Cape, South Africa. Abgerufen am: 07.07.2023. Verfügbar unter: <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. Berlin: Springer-Verlag.
- Walston Jr. 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. Argonne: Argonne National Laboratory.
- Walston L. J., Li Y., Hartmann H. M., Macknick J., Hanson A., Nootenboom C., Lonsdorf E. & Hellmann J. (2020): Modeling the ecosystem services of native vegetation management practices at solar energy facilities in the Midwestern United States. Abgerufen am: 06.07.2023. Verfügbar unter: <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. Lemont: Environmental Science & Technology.
- Water Science School (2018): Evapotranspiration and the Water Cycle. Abgerufen am: 20.08.2023. Verfügbar unter: <https://www.usgs.gov/special-topics/water-science-school/science/evapotranspiration-and-water-cycle#overview>.
- Wesselak V. & Voswinckel S. (2016): Photovoltaik - Wie Sonne zu Strom wird. Nordhausen: Institut für Regenerative Energiesysteme, Fachhochschule Nordhausen.
- Wirth H. (2022): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
- Wissenschaftliche Dienste (2019): Dokumentation. Naturschutzrechtlicher Eingriffs-Ausgleich bei der Errichtung Erneuerbarer-Energien-Anlagen. Berlin: Deutscher Bundestag, Fachbereich WD8: Umwelt, Naturschutz, Reaktorsicherheit, Bildung und Forschung.

Wit F. & Biesmeijer K. (2020): The effects of solar parks on plants and pollinators: the case of Shell Moerdijk. Leiden: Pollinator Ecology Group, Naturalis Biodiversity Center.

Wydra K., Vollmer V., Schmidt S., Prichta S., Kunze R. & Aulich H. (2022): Potential der Agri-Photovoltaik in Thüringen. Erfurt: SolarInput e.V..

Gesetze und Vorschriften

BauGB: Baugesetzbuch in der Fassung der Bekanntmachung vom 3. November 2017 (BGBl. I S. 3634), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 12. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 184) geändert worden ist.

BauNVO: Baunutzungsverordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 21. November 2017 (BGBl. I S. 3786), die zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 3. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 176) geändert worden ist.

BNatschG: Bundesnaturschutzgesetz vom 29. Juli 2009 (BGBl. I S. 2542), das zuletzt durch Artikel 3 des Gesetzes vom 8. Dezember 2022 (BGBl. I S. 2240) geändert worden ist.

Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 4 des Gesetzes vom 26. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 202) geändert worden ist.

Gesetz zum Schutz der Insektenvielfalt in Deutschland und zur Änderung weiterer Vorschriften. Vom 18. August 2021.

ThürBO: Thüringer Bauordnung in der Fassung der Bekanntmachung vom 13. März 2014, die zuletzt durch das Gesetz vom 29.07.2022 (GVBl. S. 321) geändert worden ist.

WEEE-Richtlinie: Directive 2012/19/EU of the European Parliament and of the Council of 4 July 2012 on waste electrical and electronic equipment.

WHG: Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 3. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 176) geändert worden ist.

Geodaten

ALKIS-Daten: <https://www.geoportal-th.de/de-de/Downloadbereiche/Download-Offene-Geodaten-Thüringen/Download-ALKIS-flurweise>. Abgerufen am: 29.08.2023.

Bodenrichtwerte: <https://www.geoportal-th.de/de-de/Downloadbereiche/Download-Offene-Geodaten-Thüringen/Download-Bodenrichtwerte>. Abgerufen am: 29.08.2023.

Digitale Topografische Karte: <https://www.geoportal-th.de/de-de/Downloadbereiche/Download-Offene-Geodaten-Thüringen/Download-Topographische-Karten>. Abgerufen am 29.08.2023.

Digitales Landschaftsmodell: <https://www.geoportal-th.de/de-de/Downloadbereiche/Download-Offene-Geodaten-Thüringen/Download-ATKIS-Basis-DLM>. Abgerufen am: 29.08.2023.

Globalstrahlung (Energieatlas Thüringen): <https://karte.energieatlas-thueringen.de/#null>. Abgerufen am: 29.08.2023.

Landnutzung: https://antares.thueringen.de/cadenza/pages/map/default/index.xhtml?jsessionid=8718A11F7BDE1DE7364C559144432E1E?mapId=6a73b81d-1602-46ff-b30f-7df0d657017e&repositoryItemGlobalId=Anwendungen.Allgemeine+Ebenen.Hintergrundthemen.Landnutzung.landnutzung%2Flandnutzung_800.layer&mapSrs=EPSG%3A25832&mapExtent=469366.38776978414%2C5543501%2C849652.6122302159%2C5745719. Abgerufen am: 29.08.2023.

Luftbilder und Orthophotos: <https://www.geoportal-th.de/de-de/Downloadbereiche/Download-Offene-Geodaten-Thüringen/Download-Luftbilder-und-Orthophotos>. Abgerufen am: 29.09.2023.

Naturschutz mit Schutzgebieten: <https://antares.thueringen.de/cadenza/?jsessionid=99D87CFF018AB117C3C77593D2525C13>. Abgerufen am: 29.08.2023.

Themenkarten zum Stromnetz: <https://www.flosm.de/html/index.html>. Abgerufen am: 29.08.2023.

Eidesstaatliche Versicherung

Ich versichere hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde weder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt noch veröffentlicht.

Erfurt, 05.09.2023

Stefan Gessert

Matrikelnummer: 10351507

Anhang

Tabelle 2: Datenmatrix
(Quelle: eigene Ausarbeitung)

Kategorie	Name / Titel	Jahr	Kernaussagen	Handlungsempfehlungen	Organismen	Bewertung	Faktor (w/1?)	Quelle
Projektbericht	GEO-Tag der Natur (2021): Biodiversität in Solarparks	2021	- 7 Untersuchungsstandorte und mit Einzelbeobachtungen (hier zusammengefasst -> da im Rahmen eines Projektes und für mehr Aussagekraft) - aufgrund von Störungsamt, Verzicht von Pflanzenschutzmitteln und intensiver Bewirtschaftung haben sich artenreiche Lebensräume entwickelt		Vögel, Flora, Reptilien (Zaunleiche), Amphibien (Kreuzkröte)	2	1 (Rein Faktor, da kein wissenschaftlicher Anspruch, aber wichtige Beobachtungen in Bezug auf einige rote Liste Arten (Zaunleiche, Wiesenspieger, Kreuzkröte, Ödlandschnecke)	Bundesverband Neue Energiewirtschaft (Bne) e.V. (2021): GEO-Tag der Natur (2021): Biodiversität in Solarparks. Berlin: Bundesverband Neue Energiewirtschaft (Bne) e.V.
Projektbericht	Untersuchungsbericht zum Forschungsprojekt „Wissenschaftliche Untersuchungen zur Entwicklung eines Modellkonzepts für naturnverträgliche und biodiversitätsfördernde Solarparks“ am Hermann-Hoppe-Institut der TH Bingen	2021	- 3 Untersuchungsflächen - Solarparks, die auf Ackerflächen errichtet wurden, intensiv bewirtschaftet werden und sich über 8 bis 11 Jahre entwickeln konnten, können durchaus die Biodiversität fördern	- Höhe Modulfläche - extensive Bewirtschaftung - Maßnahmen für Bestäuberinsekten	Flora, Anthopoden	1	3 (aufwendiges Untersuchungsverfahren)	Hietel E., Lenz C. & Schnaubelt H.L. (2021) Untersuchungsbericht zum Forschungsprojekt „Wissenschaftliche Untersuchungen zur Entwicklung eines Modellkonzepts für naturnverträgliche und biodiversitätsfördernde Solarparks“. Abgerufen am: 06.07.2023. Verfügbar unter: über die Hochschule Bingen.
Projektbericht	The effects of solar parks on plants and pollinators: the case of Shell Moerdijk	2019	- Untersuchungen von Auswirkungen auf Bestäuber und Pflanzen in einem 39 Hektar großen PV-Park (Niederlande) - 5 Samenmischungen und eine Kontrollparzelle	- Strukturelemente als Nistmöglichkeiten - Saatgutmischungen mit Blühpflanzen - Abstände zwischen Modulreihen	Flora, Bestäuber	1	2 (nur ein Jahr und nur eine Anlage und gezielt verschiedene Saatgutmischungen zur Förderung)	Wit, F. & Biesmeijer K. (2020): The effects of solar parks on plants and pollinators: the case of Shell Moerdijk. Leiden: Pollinator Ecology Group, Naturalis Biodiversity Center.
Projektbericht	Native Vegetation Performance under a Solar PV Array at the National Wind Technology Center	2017	- Vegetationsentwicklung unter PVA-Panels unter Einbezug verschiedener Saatgutmischungen und Beschattungseffekte - niedrig wachsende Gräser (mit oder ohne schattentolerante Arten) und Leguminosen können innerhalb von drei Jahren eine umfangreiche neue Pflanzendecke bilden		Flora	1	3 (nur eine Anlage, aber verschiedene Untersuchungsparameter und komplett entfernter Vegetationsdecke mit Wiederbegrünung beim Bau der Anlage)	Betty B., Macknick J., McCall J. & Braus G. (2017): Native Vegetation Performance under a Solar PV Array at the National Wind Technology Center. Golden: National Renewable Energy Laboratory.
Projektbericht	Artenschutz unter Strom	n.A.	- Doppelnutzung durch Biotopstrukturen in Solarfeld in Bayern. - 189 Pflanzen- und 286 Tierarten sind nachgewiesen, darunter 44 Vogelarten, 14 Wildblumenarten, 73 Spinnenarten und 143 Schmetterlingsarten. Auch haben sich der Grundwasserpegel und die Wasserqualität im Wehler nach kurzer Zeit deutlich verbessert - Solarfeld ist nun ein Trittsteinbiotop, das andere Biotopflächen in der intensiv landwirtschaftlich genutzten Umgebung verbindet		Flora, Vögel, Bestäuber, Schmetterlinge	2	1 (nur eine kleine Anlage in Bayern mit gezielter Strategie zur Biodiversitätsförderung)	Land.belebt (n.J.): Artenschutz unter Strom. Bodenkirchen: Land.belebt.
Projektbericht	POTENTIAL IMPACTS OF SOLAR, GEOTHERMAL AND OCEAN ENERGY ON HABITATS AND SPECIES PROTECTED UNDER THE BIRDS AND HABITATS DIRECTIVES	2020	- negative Auswirkungen sind standortspezifisch - Störungs- und Verdrängungseffekte - Möglichkeiten zur Verbesserung der Artenvielfalt durch PV-Anlagen geboten		Vögel	1	1 (lediglich potentielle Auswirkungen durch Sekundärdaten begründet - Auswirkungen immer Standortpezifisch)	Lammerman L., Laursen I. & Driess 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 BVA-3/369/2017/0002 Project: "Re-evaluating and mitigating the impacts of renewable energy developments on habitats and species protected under the Birds and Habitats Directives", Arcadis Belgium, Institute for European Environmental Policy, BirdLife International, NIRA, Stella Consulting, Ecosystems Ltd, Brussels.
Projektbericht	Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE)	2020	- baubedingte, anlagenbedingte und betriebsbedingte Auswirkungen PV-FA einen positiven Beitrag für die Vernetzung von Offenlandstandorten im Biotopverbund leisten können	- Raumwidestandsanalyse	Flora, Vögel, Heuschrecken, Insekten, Tagfalter, Amphibien, Reptilien, Wildstee	1	4 (sehr umfangreiche und detaillierte Metaanalyse -> überwiegend positive Argumente, teilweise ein par negative)	Badel O., Niepert R., Wiehe J., Matthies S., Gewohn T., Statzmann M., Brendel R. & von Haaren C. (2020): Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE). Hannover: Niedersächsisches Ministerium für Umwelt, Energie, Bauen und Klimaschutz.
Studie	Solarparks - Gewinne für die Biodiversität (Bne)	2019	- PVA sind geeignet, die Biodiversität zu fördern. - Standorte, auf denen PVA errichtet werden, erlangen in der Regel eine höhere Diversität als vorher. Einschränkungen hierfür lassen sich aus den vorliegenden Unterlagen nicht deutlich belegen, sind aber an Standorten vorstellbar, an denen im Ausgangszustand bereits eine hohe Diversität ausgeprägt war. Allerdings ist davon auszugehen, dass dies - zumindest bei Vorkommen gefährdeter Arten - durch eine adäquate Standortwahl von Kombination vermieden wird. - Eine wesentliche Voraussetzung für eine Steigerung der Biodiversität ist die Gestaltung der Anlagen (breite Abstände zwischen Modulreihen werden intensiv besiedelt, z. B. von Zaunleichen, enge Modulreihen bleiben teilweise unbesiedelt) und die Pflege der Reihenzwischensäume (extensive Grünlandnutzung mit Abfahnen des Mahdgutes)	- Abstand der Modulreihen, Blütenhorizonte, keine Düngung oder Pflanzenschutzmittel, extensive Nutzung (Imkere, Gärtnerei, Beweidung)	Insekten, Reptilien, Brutvögel	2	4 (sehr hohe Anzahl an Solarparks (75) aber hohe Heterogenität der Studien - schwierig zur Auswertung)	Peschel R., Dr. Peschel T., Dr. Marchand M. & Hauke J. (2019): Solarparks - Gewinne für die Biodiversität. Berlin: Bundesverband Neue Energiewirtschaft (Bne) e.V.
Studie	The Effects of Solar Farms on Local Biodiversity: A Comparative Study	2016	- vier Schlüsselindikatoren -> Botanik, Vögel, Bestäuber und Fledermaus -> Untersuchung der Artenvielfalt und -häufigkeit - Vergleich mit Kontrollgrundstück - Botanik: größere Vielfalt - Bestäuber: höhere Anzahl (höher je höher die botanische Vielfalt) - Vögel: an zwei Standorten größerer Vagabundismus -> Grundsätzlich sind Solarparks aber gut für Erhaltungszustand - höhere Fledermausaktivität an 3 Standorten - Bewirtschaftung des Solarparks ist wichtig für Biodiv. (auch Wildemaßnahmen beachten)	- artenreiche Wildblumenmischung, schützender Schuttbeweidung, Wildtiermanagement	Bestäuber, Vögel, Fledermaus, Flora (Grass und Laubpflanzen)	1	3 (11 Solarparks im Süden Englands für eine Vegetationsperiode, entsprechende Maßnahmen, absolut keine Verschlechterung der Biodiv. aber auch nicht immer signifikante Verbesserung (z.B. Fledermaus) - bereits eingesetzte Maßnahmen)	Montag H., Dr. Parker G. & Clarkson T. (2016): The Effects of Solar Farms on Local Biodiversity: A Comparative Study. Blackford: Clarkson and Woods and Wyewood Biodiversity.
Studie	Assessment on the local climate effects of solar parks	2020	- Auswirkung von Solarparks auf Klima und Ökosystemfunktion - kühlere Luft- und Bodentemperaturen sowie höhere Luftfeuchtigkeit unter den Panels während der Vegetationsperiode im Vergleich zu Lücken zwischen den Panels			1	2 (Auswirkungen noch unzureichend geklärt, aber untersuchte Ergebnisse positiv)	Makaronidou M. (2020): Assessment on the local climate effects of solar parks. Lancaster: Lancaster University.
Studie	Potential der Agri-Photovoltaik in Thüringen	2022	- Bei richtigem Management kann Biodiversität vergrößert und neue Lebensräume (habitat islands) für gefährdete Tiere und Pflanzen geschaffen werden			1	3 (Studie über APV, aber Biodiavassagen über FFPV allgemein und viele wissenschaftliche Quellen)	Wytke K., Vollmer V., Schmidt S., Pichs S., Kunze R. & Aulich H. (2022): Potential der Agri-Photovoltaik in Thüringen. Erfurt: Solarinput e.V.
Studie	Die Brutvögel großflächiger Photovoltaikanlagen in Brandenburg	2013	- umliegende unbebaute Gebiete zeigten eine viel höhere Anzahl von Brutvögeln - höhere Populationsdichte außerhalb der Anlagen insbesondere für Habitatspezialisten - Solarparks beherbergen vor allem Arten, die nur kleine Spalten oder Lücken für ihre Brut benötigen - einige Vögel nutzen die Strukturen von Solarparks als Nahrungs- oder sogar Bruthabitat; zwischen den Sonnenkollektoren brüteten auch anspruchsvollere Arten	- Schutz bzw. Erstellen unterschiedlicher Strukturen sowie naturschutzgerechte Mähen zwischen den Panels essenziell	Vögel	1	3 (Studie über 3 Jahre an 2 großen Solarparks aber noch aus 2013)	Höltsch P. & Neuling E. (2013): Die Brutvögel großflächiger Photovoltaikanlagen in Brandenburg. Vogelwelt 134: 155-179.
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland	2022	- PV-Anlagen fördern Renaturierung (von z.B. LW-Flächen) - kann Auszootropung von Moorflächen verhindern bzw. Wiedervermischung fördern	- vergrößerte Reihenabstände - Einsatz Wildpflanzeneinschmischung	- Flora, Vögel	2	3 (sehr aktuelle Faktenzusammenstellung, Fraunhofer Institut renommierte Forschungseinrichtung, aber nur Sekundärdaten und nur kurzer Abschnitt zu Ökologie)	Wirth H. (2022): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Freiburg: Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States	2016	- 3 PV-Anlagen in Südkalifornien aus denen systematisch Vogelsterblichkeit abgeschätzt und berechnet werden konnten - Vogelsterblichkeit deutlich niedriger als durch andere anthropogene Einflüsse und Aktivitäten		Vögel	0	1 (lediglich Hochschätzung und quasi keine wirkliche Aussage zu positiven oder negativen Auswirkungen)	Walston Jr. L. J., Rollins K.E., LaGory K.E., Smith K.P. & Hayes S.A. (2016): A preliminary assessment of avian mortality at utility-scale solar energy facilities in the United States. Argonne: Argonne National Laboratory.

wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Urban renewable energy and ecosystems: integrating vegetation with ground-mounted solar arrays increases arthropod abundance of key functional groups	2020	- beträchtliche Häufigkeit und Vielfalt unter bodenmontierten Solaranlagen ->insbesondere bei in die Vegetation integrierten Anlagen - Win - Win - Situation für Klimaschutz, Arthropodenreichtum (=Nahrungsquelle) und somit Funktionieren des Ökosystems	Arthropoden (Gliederfüßer)	2	3 (8 Untersuchungsstandorte und Umkreis von 2km)	Armstrong J.H., Kulikowski A.J. & Philpott S.M. (2020): Urban renewable energy and ecosystems: integrating vegetation with ground-mounted solar arrays increases arthropod abundance of key functional groups. Zugriff am: 03.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1007/s11252-020-01063-6 .	
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	A Conceptual Framework to Design Green Infrastructure: Ecosystem Services as an Opportunity for Creating Shared Value in Ground Photovoltaic Systems	2020	- PV soll darauf abzielen wirtschaftlich private Interessen mit öffentlichen, sozialen und ökologischen Interessen in Einklang zu bringen - Vorschlag von PV-Systemen um Wirtschaftlichkeit und Verbesserung der biologischen Vielfalt zu harmonisieren -> PV-Systeme als grüne Infrastruktur	- 1. Landschaftsanalyse, 2. Identifizierung des vorherrschenden Ökosystems, 3. Wechselwirkungen von Vegetation anhand von Musterbeispielen planen, 4. Angaben des wirtschaftlichen Nutzens unter Berücksichtigung einzelner zuvor erstellter Variationen		2	1 (da lediglich theoretische Studie und kein reales Anwendungsbeispiel)	Semenaro T., Antano R., Bara A., Pomes A., Giudice C., Datto E., Lenucci M., Buccolieri R., Emmauvel R., Gao Z. & Scognamiglio A. (2020): A Conceptual Framework to Design Green Infrastructure: Ecosystem Services as an Opportunity for Creating Shared Value in Ground Photovoltaic Systems. Lecce: Department of Biological and Environmental Sciences and Technologies.
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Examining the Potential for Agricultural Benefits from Pollinator Habitat at Solar Facilities in the United States	2018	- Bestäubung als wichtigste Dienstleistung im Ökosystem - durch Vegetationsmanagement soll neuer Lebensraum für Bestäuber bereitgestellt werden (in Agrarlandschaften) im Einklang mit PV-Anlagen, welche oft in Agrarländen zu finden sind	- Bestäuberhabitate	Bestäuber	2	3 (5 Bestäubungsabhängige Kulturpflanzen (90% der LW) betrachtet und 1500km² Agrarland)	Watson L. J., Mishra S. K., Herrmann H. M., Holowesky L., McCall J. & Macknick J. (2018): Examining the Potential for Agricultural Benefits from Pollinator Habitat at Solar Facilities in the United States. Lemont: Environmental Science & Technology.
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Planning ground based utility scale solar energy as green infrastructure to enhance ecosystem services	2018	- Monokulturen im Agrarsektor führen zu Verlust biologischer Vielfalt und Ökosystemfunktionen - Bestäubung für ökologische und landwirtschaftliche Systeme essentiell - Methodik zur Harmonisierung der Energieerzeugung, der Landwirtschaft und der Verbesserung der Ökosystemleistungen	- Nutzung als Weideland, Maßnahmen für Bestäuberpopulationen	Bestäuber	1	2 (bereits vorhandene PV-Flächen können für Bestäuber aufgewertet werden ohne landwirtschaftliche Gebiete zu beeinträchtigen)	Semenaro T., Pomes A., Giudice C. D., Negro D. & Antano R. (2018): Planning ground based utility scale solar energy as green infrastructure to enhance ecosystem services. Abgerufen am: 04.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.01.050 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	A summary of bird mortality at photovoltaic utility scale solar facilities in the Southwestern U.S.	2020	- Untersuchung von Vogeltöblichkeitsrate in Zusammenhang mit PV-Anlagen - High-End-Schätzung der durchschnittlichen jährlichen Sterblichkeitsrate: 2,49 Vögel pro MW und Jahr		Vögel	1	1 (Unschärfe der Mortalität bei ca. 54% der intablen Kategorie unsicher)	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. Abgerufen am: 04.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232034 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Wind, sun, and wildlife: do wind and solar energy development 'short-circuit' conservation in the western United States?	2020	- ökologische Auswirkungen der Entwicklung erneuerbarer Energien, immer noch mit großen Unsicherheiten - aber realisierbare Möglichkeiten, um den Schutz der Tierwelt Voran zu rücken	- frühere Untersuchungen betrachtet Anwendung neuerer Abhilfetechniken - Bewertung von Landnutzungsszenarien	Wildtiere / Säugetiere	0	1 (verschiedene Handlungsansätze zur Verbesserung der "Missstände")	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? Abgerufen am: 07.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab8846 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Assessing the toxicity of Pb- and Sn-based perovskite solar cells in model organism Danio rerio	2016	- Auswirkungen von freigesetzten Schwermetallen aus Perowskit-Solarzellen auf den Zebrafisch - effizientesten Solarzellen -> enthalten alle Blei -> alternativ Zinn, aber sehr instabil und schädlich - Zinn-basierte Solarzellen sehr umweltschädlich bei Freisetzung und keine gute Alternative zu Blei (instabiles Produkt in Umgebungsgasphase)		Säugetiere	1	2 (aufwendiges und wissenschaftlich hochwertiges Testverfahren)	Babayigit A., Thanh D. D., Bhiryani A., Manca J., Müller M., Boyen H.-G. & Conings Bert (2016): Assessing the toxicity of Pb- and Sn-based perovskite solar cells in model organism Danio rerio. Abgerufen am: 04.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1038/nmp18721 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	The Photovoltaic Heat Island Effect: Larger solar power plants increase local temperatures	2016	- Wärmeisoleffekt durch empirische Datenerhebung untersucht, im Gegensatz zu bisher nur simulierten Modellen - Temperaturen regelmäßig Nachts 3-4 Grad wärmer als freie Wildbahn - Messungen widerlegen Modellrechnungen, welche Kühlungseffekt voraus sagten				1 (keine Modellrechnung, sondern reale Datenerhebung - Temperatureinfluss auf Mikroklima entscheidender Faktor für Biodiv.)	Barnes-Galland 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. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.scienv.2016.01.010 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Sustainability of utility-scale solar energy – critical ecological concepts	2017	- Diskussion von 5 Konzepten, welche auf die Entwicklung einer nachhaltigen PV-PA anwendbar sind - Konzepte bieten Rahmen zur Reduzierung für negative Umweltauswirkungen - keine Generalisierung möglich, da individuelle Ansprüche		Insekten, Vögel, Fledermäuse, Reptilien	0	1 (lediglich theoretische Konzeptentwicklung)	Moore-O'Leary K. A., Hernandez R. R., Johnston D. S., Abella S. R., Tanner K. E., Swanson A. C., Kretzler J. & Lovich J. E. (2017): Sustainability of utility-scale solar energy – critical ecological concepts. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1002/bee.1517 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants	2021	- Studie bewertet Vegetation von PV-PA und potentielle Bedeutung für umliegenden Ökosystem - Standort bietet Möglichkeiten einheimische Pflanzen zu beherbergen und eine Basis für ein funktionierendes und stabiles Ökosystem zu bilden	- zwischen den Modulen: mehrjährige Gräser und Kräuter - unter den Modulen: mehrjährige Kräuter - Pflege durch mähen	Flora	2	3 (neue Datenerhebung durch Phytosozeose Auswertung über 2 Jahre, aber nur eine Anlage)	Udrişoiu D., Kováčiková M., Jakubík A., Vavrová M. D., Winkler J. (2021): Ecological effects of preferential vegetation composition developed on sites with photovoltaic power plants. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.xcoleng.2021.106274 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Current site planning of medium to large solar power systems accelerates the loss of the remaining semi-natural and agricultural habitats	2021	- Zunahme des Ausbaus von PV hat zur Zerstörung von Lebensräumen von Wildtieren geführt - gerade mittelgroße Anlagen führen zu hohen Flächenverlust naturnäher Lebensräume - kostenbasierte Standortauswahl steht über Schutz von Lebensräumen und biologischer Vielfalt	- nachhaltige Standortauswahlkriterien	Wildtiere	2	2	Kim J. Y., Koide D., Ishihama F., Kadoya T., Nishihira J. (2021): Current site planning of medium to large solar power systems accelerates the loss of the remaining semi-natural and agricultural habitats. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.scienv.2021.146475 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure	2020	- Solarenergieinfrastruktur kann umfangreiche Landschaftsmodifikationen mit Auswirkungen auf ökologische Funktion des Bodens zur Folge haben - Wiedereinführung heimischer Vegetation kann zur Regeneration des Bodens genutzt werden - Kohlenstoff und Stickstoff im PV-Boden niedriger als im Referenzboden - Umverteilung der Feuchtigkeit im Boden (durch tropfende Paneele) kann als Strategie für Pflanzen genutzt werden		Flora	1	2 (da nur eine Anlage, aber Untersuchung 7 Jahre nach Begrünung und Vergleich mit Referenzgrünland)	Choi C. S., Café A. E., Macknick J., Bloom D. E., Caplan J. & Sujin R. (2020): Effects of Revegetation on Soil Physical and Chemical Properties in Solar Photovoltaic Infrastructure. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1388/jrns.2020.00140 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Evaluating potential effects of solar power facilities on wildlife from an animal behavior perspective	2020	- kaum Forschungsergebnisse wie sich PV-Anlagen auf Tierwelt auswirken - Konzentration auf Verhalten von Tieren, als Indiz für Populationsreaktionen		Wildtiere	0	1 (keine wirklichen Aussagen zu Auswirkungen, aber Aussage dass Studien wichtig sind um Auswirkungen zu verstehen)	Chock R. Y., Clucas B., Peterson E. K., Blackwell B. F., Blumstein D. T., Church K., Fernandez-Juricic E., Francescoli G., Grogger A. L., Kemp P., Pinho G. M., Sanzenbacher P. M., Schulte B. A. & Toni P. (2020): Evaluating potential effects of solar power facilities on wildlife from an animal behavior perspective. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1111/csp2.319 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems	2019	- großflächige Anlagen können Lebensraumverluste mit sich bringen - Landschaftsveränderungen können sich auf Lebensraumqualität und Migrationsrouten auswirken - Chance der Biodiv-Verbesserung und neuer Lebensräume für gefährdete Tiere und Pflanzen		Vögel, Wildtiere	0	2 (da Sekundär-/Metadaten)	Dhar A., Naeth M. A., Jennings P. D. & Bin M. G. (2019): Perspectives on environmental impacts and a land reclamation strategy for solar and wind energy systems. Abgerufen am 05.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.scienv.2019.134602 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling	2016	- Im Sommer Austrocknung unter PVA - Im Winter sind Temp. unter PVA höher - Schwankungen von Temp. und Luftfeuchtigkeit unter PVA geringer		Flora	1	2 (Effekt der Studie schon stark, allerdings auch die Erkenntnis des Potentials von PV nach systematischer Bewertung der Auswirkungen)	Armstrong A., Ostle N. J. & Whittaker J. (2016): Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. Abgerufen am: 05.07.2023. Verfügbar unter: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/11/7/074016 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem.pdf	2021	- Auswirkungen von Solaranlagen auf die Pflanzensammensetzung, den Blütezeitpunkt und das Futterverhalten von Bestäubern von Juni bis September (nach der Hauptblüte) in vollschattigen und halbschattigen Parzellen unter Solarpaneelen sowie in vollsonnigen Parzellen (Kontrollen) - Zunahme an Blütenfülle und Blüte in Halbschattiparallele verzögert -> kommt den Sammlern in Spätsaison zu gute - Bestäubervielfalt vollsonnig, halbschattig > vollschattig	- Wiederherstellung von Bestäuberlebensräumen	Bestäuber	2	2 (nur eine Anlage und eine Vegetationsperiode, aber bereits 4 Jahre alt und umfangreiche Untersuchung)	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. Abgerufen am: 06.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Modeling the ecosystem services of native vegetation management practices at solar energy facilities in the Midwestern United States	2020	- Untersuchung zu Reaktion von 4 Ökosystemdienstleistungen (Kohlenstoffspeicherung, Bestäuberanwesenheit, Sedimentretention, Wasserretention) in 30 Solaranlagen - Vergleich zu vollsonniger LW-Nutzung - Steigerung der Kohlenstoffspeicherungspotential um 65% - dreifache Steigerung des Bestäuberangebots - Anstieg der Sediment- und Wasserretention um 95% und 19%		Flora	2	4 (30 Solarparks, 4 untersuchte Ökosystemdienstleistungen)	Watson L. J., Li Y., Herrmann H. M., Macknick J., Hanson A., Nootenboom C., Lonsdorf E. & Hellmann J. (2020): Modeling the ecosystem services of native vegetation management practices at solar energy facilities in the Midwestern United States. Abgerufen am: 06.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101227 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Erneuerbare Energien und Naturschutz – Solarparks können einen Beitrag zur Stabilisierung der biologischen Vielfalt leisten	2015	- durch den Betrieb der Solarparks im Vergleich zur vorherigen Acker- oder Intensiv-Grünlandnutzung ist deutliche Aufwertung der Flächen möglich - Solarparks leisten einen erstaunlich hohen Beitrag für die regionale Artenvielfalt - u.a. rote Liste Arten -> 10 Tierarten und 26 Pflanzenarten	- Nähe zu Lebensbiotopen unter 500m - Pflegehinweise für Flora und Fauna	Flora, Vögel, Schmetterlinge, Heuschrecken	2	3 (5 untersuchte Anlagen mit empirischer Datenerhebung, aber schon recht alte Studie)	Raab, B. (2015): Erneuerbare Energien und Naturschutz – Solarparks können einen Beitrag zur Stabilisierung der biologischen Vielfalt leisten. Laufen: ANLIEGER Natur.
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Freiflächen-Solaranlagen und Naturschutz – Eingriff oder Verbesserung im Vergleich zur Landwirtschaft	2015	- entscheidend: welche Anlagenart und welche Fläche - Einzäunung kann Barriere für bestimmte Tiere sein - Lichtreflexe der Anlage - Anlage kann weitere Nahrungsquelle und neuer Lebensraum sein	- Abflussrinnen - Bodenfreiheit Zaun	Vögel, Wildtiere	0	2 (Sekundärdaten/Meta-Studie)	Wagner J. & Trumpp S. (2015): Freiflächen-Solaranlagen und Naturschutz – Eingriff oder Verbesserung im Vergleich zur Landwirtschaft. Berlin: Springer-Verlag.

wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Best Practices in Responsible Land Use for Improving Biodiversity at a Utility-Scale Solar Facility	2018	Untersuchungen der Artenvielfalt in einer der weltweit größten PV-Anlage - Daten der biologischen Überwachung vor und nach dem Bau - ähnlich hohe Vegetationsproduktion (im Vergleich zu Referenzstandort) - Vorkommen dutzender Wildtierarten (auch im besonderen Schutzstatus)	-	Flora, Wildtiere	2	2 (Daten vorher und nachher von sehr großer Anlage (vgl. Landnutzung))	Sinha P., Hoffman B., Sakers J. & Althouse L. (2018): Best Practices in Responsible Land Use for Improving Biodiversity at a Utility-Scale Solar Facility. Abgerufen am: 06.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1525/cse.2018.001123 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks	2021	- Solarparks mit erheblichen Potential die Artenvielfalt von Bestäubern zu erhöhen - mikroklimatische Variationen können erzeugt werden	Überwachung in Bezug auf Managementstrategien	Bestäuber	1	3 (zwei Sekundärdaten/Metaanalyse aber 185 Artikel)	Blagdes H., Potts S.G., Whyatt I.D. & Armstrong A. (2021): Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. Abgerufen am: 06.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.jenv.2021.111065 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Photovoltaik und Biodiversität – Integration statt Segregation!	2023	- Zahlreiche Beispiele belegen plausibel die Synergieeffekte von Solarparks sowie Förderung und Schutz von Biodiversität - Weitergehende Forschung hinsichtlich der Effekte von Solarparks ist erforderlich, denn es bestehen Defizite in vielen Bereichen. Als Beispiele seien Adaptions-leistungen von Vögeln genannt	gebietsheimische Saatgutmischungen - extensive Bewirtschaftung - Abstand der Modulreihen durch Berechnungsmethode	Bestäuber, Vögel	1	2 (Zusammenfassung von Sekundärdaten, aber 52 verwendete wissenschaftl. Quellen)	Frechsel T. & Frechsel R. (2023): Photovoltaik und Biodiversität – Integration statt Segregation! Stuttgart: Naturschutz und Landschaftsplanung, Verlag Eugen Ulmer.
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Remarkable agriovoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency	2018	- Bereiche unter PV-Solarmodulen behalten während des gesamten Beobachtungszeitraums eine höhere Bodenfeuchtigkeit bei. - deutlicher Anstieg der Biomasse in der Spätsaison auch für Bereiche unter den PV-Modulen (90 % mehr Biomasse) - Bereiche unter PV-Modulen waren deutlich wassereffizienter (328 % effizienter)	-	Flora	2	3 (Primärdaten 2 Jahre nach Bau der Anlage durch Mikroklimatische Stationen)	Hassempour A. E., Selver J.S. & Higgins C.W. (2018): Remarkable agriovoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. Oregon: Department of Biological and Ecological Engineering.
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Utility-scale solar energy facilities – Effects on invertebrates in an arid environment	2019	- Auswirkungen der Solarenergie auf Wirbellosegemeinschaften 3 Lebensräume -> Solarpark, Kraftwerksblock, umliegendes Weideland - keine signifikanten Unterschiede in Vielfalt und Reichtum	-	Wirbellose	1	2 (Primärdaten aber nur eine Anlage, Vergleich von 3 Lebensräumen)	Jeal C., Perold V., Seymour C. L., Ralston-Paton S. & Ryan P. G. (2019): Utility-scale solar energy facilities – Effects on invertebrates in an arid environment. Abgerufen am: 07.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.jenv.2019.05.008 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Extremophilic microbial communities on photovoltaic panel surfaces: a two-year study	2020	- Langzeitstudie zum Besiedlungsprozess von Solarpaneelen - Artenreichtum und Biodiversität unterliegen saisonalen Schwankungen - Ergebnisse zeigen dass Paneele Extremumgebungen sind	-	Bakterien	0	3 (Langzeitstudie)	Tanner K., Molina-Menor E., Latore-Perez A., Vidal-Verdu A., Vilanova C., Peneo I. & Porcar M. (2020): Extremophilic microbial communities on photovoltaic panel surfaces: a two year study. Abgerufen am: 07.07.2023. Verfügbar unter: https://ami-journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/1751-7915.13620 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Assessing the impacts of a utility-scale photovoltaic solar energy facility on birds in the Northern Cape, South Africa	2018	- Bewertung des Einflusses von einer der größten PV-Anlagen Südafrikas auf Vogelmenschen - Bewertung des Risikos der Sterblichkeit durch Vogelkollisionen - Anzahl und Artenreichtum tendenziell geringer als im Umland aber kaum Sterblichkeit (4,5 Toodefälle pro MW pro Jahr (extrapoliert))	-	Vögel	1	2 (lediglich 3-monatige Datenerfassung und nur eine Anlage, aber größte in Südafrika)	Visser E., Perold V., Ralston-Paton S., Cardinal A. C. & Ryan P. G. (2018): Assessing the impacts of a utility-scale photovoltaic solar energy facility on birds in the Northern Cape, South Africa. Abgerufen am: 07.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.08.106 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Land Conversion for Solar Facilities and Urban Sprawl in Southwest Deserts Cause Different Amounts of Habitat Loss for Ashmeadiella Bees	2020	- Untersuchung und Schätzung zum Lebensraumverlust von Bienen von 2010 bis 2015 - Arten sind nicht wirklich von Landveränderungen betroffen	-	Wildbienen (Bestäuber)	0	2 (lediglich Hochrechnungen und Schätzungen)	McCoshum S. M. & Gewer M. A. (2020): Land Conversion for Solar Facilities and Urban Sprawl in Southwest Deserts Cause Different Amounts of Habitat Loss for Ashmeadiella Bees. Abgerufen am: 10.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.2317/0022-8567-92.2.468 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook	2020	- CO ₂ -Emission von PV 10 bis 53mal niedriger als Ölverbrennung mit weiteren Potential zur Senkung durch Weiterentwicklung	-	-	1	3 (Betrachtung ab Herstellungsprozess, Betrachtung von CO ₂ Emission)	Twalibeh M., Al-Othman A., Kafah F., Abdelazem E., Almomani F. & Alkharawi M. (2020): Environmental impacts of solar photovoltaic systems: A critical review of recent progress and future outlook. Abgerufen am: 12.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143528 .
wissenschaftliches Paper mit Peer Review	Grassland carbon-water cycling is minimally impacted by a photovoltaic array	2023	- Anlage auf Grasland - Ökosystemfunktion in bewirtschafteten Graslandflächen können aufrechterhalten werden, insbesondere in Klimazonen, in denen Wasser eine größere Einschränkung darstellt als Licht	-	Flora	1	3 (zwar geht es eher um Agri-PV aber grundlegende Erkenntnisse auch auf FF-PVA übertragbar und brandaktuell)	Kannenbergs S. A., Sturchio M. A., Venturas M. D. & Knapp A. K. (2023): Grassland carbon-water cycling is minimally impacted by a photovoltaic array. Abgerufen am: 11.07.2023. Verfügbar unter: https://doi.org/10.1038/s43247-023-00904-4 .