

Machbarkeitsstudie zur Erstellung eines satellitengestützten Monitorings von Solarparks



bearbeitet durch:

Dr. Annett Frick
Dr. Michael Förster
Annika Pauligk

LUP - Luftbild Umwelt Planung GmbH
Große Weinmeisterstraße 3a, 14469 Potsdam
www.lup-umwelt.de

LUP GmbH ist verantwortlich im Sinne des Presserechts und für die Verwendung der Abbildungen in der Publikation.

Auftraggeber:

Kompetenzzentrum Energiewende und Naturschutz (KNE)

Mai 2023

Bildnachweise Einband: LUP GmbH

Inhalt

Zusammenfassung.....	7
1 Einleitung.....	8
2 Untersuchungsgegenstand	8
2.1 Habitate und Maßnahmen.....	9
2.1.1 Habitate.....	9
2.1.2 Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen.....	12
2.2 Technische Parameter.....	12
3 Daten.....	13
3.1 Referenzdaten	13
3.1.1 Bestehende Monitoringprogramme	13
3.1.2 Luftbildinterpretation.....	14
3.1.3 Terrestrische Kartierung.....	15
3.2 Fernerkundungsdaten.....	15
3.2.1 Zeitlich hoch aufgelöste Satellitendaten.....	16
3.2.1.1 Copernicus-Satellitendaten	16
3.2.2 Spektral sehr hoch aufgelöste Satellitendaten.....	19
3.2.3 Räumlich hochauflösende Daten	19
3.2.3.1 Digitale Orthofotos	19
3.2.3.2 Kommerzielle, räumlich höchstauflösende Daten.....	20
3.2.3.3 UAV-Befliegung 2,5 oder 5 cm.....	21
3.2.4 Oberflächenmodelle und Geländemodelle.....	21
3.3 Datenverfügbarkeit und Kosten	22
4 Stand der Forschung: Biodiversitätsmonitoring mit Fernerkundung.....	24
5 Monitoringkonzept.....	33
5.1 Ableitung mit Fernerkundung erfassbarer Indikatoren.....	34
5.2 Ableitung nutzbarer Datenarten.....	37
5.3 Erstellung eines Monitoringkonzeptes	38
5.3.1 Hintergrundmonitoring.....	40
5.3.2 Landesweites Monitoring.....	42
5.3.3 Stichprobenmonitoring	44
6 Fazit.....	45
7 Literatur.....	46
8 Anlage 1 – Habitate, Maßnahmen und technische Parameter	51
8.1 Habitate	51
8.1.1 Gras- und Staudenfluren, Blühflächen.....	51

8.1.2	Feuchtbiotope / Wasserflächen	52
8.1.3	Anthropogene Rohbodenstandorte und Ruderalfluren	52
8.1.4	Trockenbiotope / Sand-, Lesestein-, Totholzhaufen	52
8.1.5	Gehölze	53
8.1.6	Heideflächen	54
8.2	Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen	54
8.2.1	Mahd	54
8.2.2	Beweidung	55
8.2.3	Anlage von Habitatelementen	55
8.3	Technische Parameter	55
8.3.1	Flächenbedarf und Anordnung	55
8.3.2	Höhe und Ausrichtung der Modultische	56
8.3.3	Versiegelung	56
8.3.4	Umzäunung / Einbindung in die Umgebung	56
9	Anlage 2 – Ergebnisse Datenrecherche	58

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Potentielle Biotoptypen und FFH-Lebensraumtypen in Freiflächensolaranlagen	10
Tab. 2:	Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen in Freiflächensolaranlagen	12
Tab. 3:	Mit Fernerkundungsmethoden erkennbare technische Parameter von Freiflächensolaranlagen	13
Tab. 4:	Übersicht der verschiedenen Trägersysteme	23
Tab. 5:	Bewertung der Vor- und Nachteile der gängigen Klassifikationsmethoden	32
Tab. 6:	Bewertung der Erfassungsgenauigkeit verschiedener Biotoptypen durch unterschiedliche Fernerkundungsdaten	35
Tab. 7:	Bewertung der Erfassungsgenauigkeit verschiedener Biotopmerkmale und Nutzungsaspekte durch unterschiedliche Fernerkundungsdaten	36
Tab. 8:	Bewertung der Erfassungsgenauigkeit verschiedener technischer Solarpark-Parameter durch unterschiedliche Fernerkundungsdaten	37
Tab. 9:	Gegenüberstellung der Herausforderungen und Lösungsvorschläge für ein fernerkundungsbasiertes Monitoring von Freiflächensolaranlagen	38

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Zusammenhang zwischen Auflösung des Sensors und Klassifikation von Vegetationseigenschaften (Quelle: LUP)	16
Abb. 2: Sentinel-2 Spektralkanäle sortiert nach räumlicher Auflösung, oben: 10m, Mitte: 20m, unten: 60m (Quelle: ESA)	17
Abb. 3: Komposit aus drei verschiedenen Aufnahmezeitpunkten (Sentinel-1 GRD-IW-VV Daten), schwarz: Wasserflächen, weiß: Gebäude, bunt: Ackerflächen, hellgrau: Wald (Quelle: LUP GmbH). 18	
Abb. 4: Solarparks sind in Sentinel-1 Bildern gut an den gleichmäßig verteilten Trafostationen zu erkennen, die das Radarsignal stark reflektieren (Sentinel-1 GRD-IW-VV Daten), weiße Punkte: Trafostationen, hellgrau: Wald (Quelle: LUP GmbH).....	19
Abb. 5: Beispiel unterschiedlicher räumlicher Auflösungsstufen in einer Zeitreihe von 2005 bis 2021 (Solarpark bei Lieberose) (Quelle: LUP GmbH).....	20
Abb. 6: Unterschied zwischen Digitalem Oberflächenmodell (DOM), Digitalem Geländemodell (DGM) und normiertem digitalem Oberflächenmodell (nDOM) (Quelle: LUP GmbH).....	22
Abb. 7: Übersicht zur Verfügbarkeit und Aktualität von Luftbildern in allen Bundesländern (Quelle: LUP GmbH).....	24
Abb. 8: Beispiel der Entwicklung von Heidefläche mit räumlich sehr hoch aufgelösten Daten zwischen 2004 und 2017 im FFH-Gebiet Reicherskreuzer Heide (Quelle: LUP GmbH).....	26
Abb. 9: links: Lesesteinhäufen in räumlich sehr hoch auflösender Drohnenaufnahme (Quelle: LUP), rechts: zeitliche Entwicklung des Solarparks Weesow-Willmersdorf zwischen 2020 und 2022 mit Sentinel-2 Daten (Quelle: Sentinel Hub)	27
Abb. 10: Klassifikationsergebnis (oben 3cm, unten 7cm Auflösung der Bilddaten), Quelle: Barnsley, Lovett und Dicks (2022).....	28
Abb. 11: Prozessablauf der Einbeziehung von Citizen Science Daten in die Klassifikation von Drohnen Daten (Quelle: Soltani (2022)).....	29
Abb. 12: Beispiel für das Ergebnis einer Maximum Entropie-Auswertung im Ahlbecker Seegrund, basierend auf Sentinel-2 Zeitreihen und RGBI-Orthofotos (Quelle: LUP GmbH).....	29
Abb. 13: Analyse der Mahdhäufigkeit und der Mahdzeitpunkte mit Hilfe von Sentinel-2 Zeitreihen (Quelle: Sentinel Hub, Sinergise).....	30
Abb. 14: Beispiel für eine Auswertung von Sentinel-2 Zeitreihen für Aspekte des Grünland-Managements, a) Beweidungsklassen reichen von 0 (keine Beweidung) bis 3 (intensive Beweidung), b) Mahdhäufigkeit von 1 bis 4, c) Düngung (ja/nein), d) Land Use Index von 0 (gering) bis >7 (sehr intensiv), (Quelle: Lange u. a. (2022)).....	31
Abb. 15: Beispielhafter technischer Workflow (Quelle: LUP GmbH)	34
Abb. 16: Schema eines fernerkundungsbasierten Monitoringkonzepts von Solarparks	39
Abb. 17: Darstellung des Solarparks Bochow im EE-Monitor (Quelle: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung 2023)	41
Abb. 18: Darstellung der Fläche des Solarparks Bochow vor Bau der Anlage, CIR-Orthofoto und Biotoptypenkartierung von 2009, in gelb Flächengrenzen der Biotoptypenkartierung, Beschriftung: Biotoptypencode, 9130 bedeutet Intensivacker, 9140 bedeutet Ackerbrache (Quelle: LUP GmbH).....	41
Abb. 19: Darstellung der Vegetationsentwicklung in Beispielbereichen des Solarparks Bochow Bild links: Beispielbereiche: 2x Freiflächen zwischen den Modulen (rot, grün), 1x Fläche mit Solarmodulen (blau), Graphik rechts: Verlauf des Vegetationsindex NDVI für 2021 (Quelle: LUP GmbH).....	42
Abb. 20: links oben: CIR-Luftbild eines Ausschnittes des Solarparks Bochow, rechts oben: Segmentierung des Ausschnittes, links unten: Extraktion der Solarmodule, rechts unten: Ableitung	

von technischen Parametern, z. B. Reihenabstand oder Verhältnis von Modulen zur Vegetationsfläche.....	43
Abb. 21: bDOM des Solarparks Bochow.....	44
Abb. 22: Extensives Grünland unter Freiflächenanlagen (Quelle: LUP GmbH).....	51
Abb. 23: Trockenbiotop in Freiflächenanlagen (Quelle: LUP GmbH).....	53
Abb. 24: Gehölzinseln in Freiflächenanlagen (Quelle: LUP GmbH).....	54
Abb. 25: Unterschiedlicher Reihenabstand in zwei Solarparks auf dem ehemaligen Flugplatz Fürstenwalde.....	56

Zusammenfassung

Die Energieerzeugung aus Solarenergie stellt einen wichtigen Baustein für eine klimafreundliche Energieversorgung dar. Die bestehenden Ziele für einen massiven Ausbau der Solarenergie gehen mit gesteigerten Flächenkonkurrenzen einher. Die Herausforderung besteht daher darin, Freiflächensolaranlagen naturverträglich zu gestalten, sodass die Arten- und Lebensraumvielfalt gefördert wird.

In der vorliegenden Studie wurde die Machbarkeit eines Monitorings von Biodiversität in Freiflächensolaranlagen mit Hilfe von Fernerkundungsmethoden untersucht. Dazu wurden zunächst zur Abgrenzung des Untersuchungsraumes die relevanten Habitate, Pflegemaßnahmen und technischen Parameter eines Solarparks beschrieben (TEIL 1). Weiterhin wurden die für ein Biodiversitätsmonitoring notwendigen Fernerkundungsdaten (TEIL 2) und zur Verfügung stehenden Fernerkundungsmethoden (TEIL 3) beschrieben. Schließlich wurde in TEIL 4 auf den Ergebnissen der TEILE 1-3 aufbauend ein Monitoringkonzept abgeleitet.

Die im Rahmen der Studie durchgeführten Recherchen zeigen, dass ein Biodiversitätsmonitoring auf Freiflächenanlagen mit den verfügbaren Fernerkundungsdaten und -methoden möglich ist. Dabei ist die Erfassungsgenauigkeit von Biotoptypen, Pflegemaßnahmen und technischen Parametern abhängig von der räumlichen und zeitlichen Auflösung der Datengrundlagen. Durch den Einsatz von multi-sensoralen und multi-temporalen Verfahren unter Verwendung von Analysemethoden des maschinellen Lernens bzw. der künstlichen Intelligenz kann die höchste Erfassungsgenauigkeit erzielt werden.

Die Zusammenstellung von Referenzdaten ist wichtig für das Training und die Validierung von Fernerkundungsmodellen. Es wird empfohlen, vorhandene Daten aus verschiedenen Quellen wie Biotopkatastern, Biodiversitätsmonitorings oder Landwirtschaftsdatenbanken zu nutzen und gegebenenfalls neue Daten durch Luftbildinterpretation oder terrestrische Kartierung zu erheben. Als Grundlage für Referenzdaten sollten außerdem bestehende Monitoringprogramme auf nationaler und regionaler Ebene genutzt werden, z.B. das High Nature Value Farmland-Monitoring und das Ökosystem-Monitoring. Citizen Science-Projekte wie Floralncognita können eine weitere potenzielle Datenquelle darstellen.

Das vorgeschlagene Monitoring-Konzept besteht aus drei Ebenen: einem Hintergrundmonitoring mit kostenfreien Satellitendaten zur Identifizierung und Überwachung bestehender Solarparks, einem landesweiten Monitoring mit amtlich verfügbaren Daten zur Bestimmung technischer Parameter und Erkennung ausgewählter Biotoptypen, sowie einem spezifischen Stichprobenmonitoring mit Drohnen für die detaillierte Erfassung von Biotopen und Zuständen.

Die Studie präsentiert das Konzept am Beispiel des Solarparks Bochow in Brandenburg und hebt die Bedeutung des Hintergrundmonitorings auf Bundesebene, des landesweiten Monitorings auf Landesebene und des Stichprobenmonitorings mit Drohnen hervor, insbesondere für Kontrollen oder Zertifizierungen.

1 Einleitung

Die Stromerzeugung aus Solarenergie ist ein wesentlicher Bestandteil für eine sichere, unabhängige und erneuerbare Energieerzeugung. Die Zielsetzungen für den Ausbau der Erneuerbaren Energien wurden mit der EEG-Novelle auf 22 Gigawatt pro Jahr festgesetzt. Dementsprechend sollen bis 2040 insgesamt 400 Gigawatt Solarleistung installiert sein (Bundesverband Neue Energiewirtschaft 2022). Dieser massive Ausbau der Solaranlagen geht mit einem großen Flächenbedarf einher. Etwa die Hälfte der Solarleistung soll auf Dächern installiert werden, die andere Hälfte auf Freiflächen. Eine zentrale Frage bei der Planung neuer Solarparks ist daher, wie die Anlagen naturverträglich gestaltet werden können, sodass im besten Fall ein positiver Beitrag zum Umwelt- und Naturschutz erzielt werden kann.

In der vorliegenden Studie wird die Machbarkeit eines Monitorings von Biodiversität in Freiflächenanlagen mit Hilfe von Fernerkundungsmethoden untersucht. Im Rahmen der Studie wird beschrieben, wie der Zustand eines Solarparks, sowohl hinsichtlich der Arten- und Lebensraumvielfalt als auch hinsichtlich technischer Parameter, durch Instrumente der Fernerkundung erfasst werden kann. Daraus soll abgeleitet werden, wie ein Monitoring zur Anwendung in der kommunalen und landesweiten Praxis aussehen könnte. Dabei wird insbesondere darauf eingegangen, in welcher Detailtiefe das Monitoring bei Verwendung verschiedener Methoden und Datengrundlagen erfolgen kann. Die Studie gliedert sich in die vier folgenden großen Abschnitte:

- Teil 1: Untersuchungsgegenstand: Beschreibung relevanter Habitate und Pflegemaßnahmen sowie technischer Parameter eines Solarparks
- Teil 2: Daten: Beschreibung verschiedener Fernerkundungsdaten und anderer Monitoringdaten sowie deren Verfügbarkeit
- Teil 3: Forschungsstand: Stand der Forschung zum Biodiversitätsmonitoring mit Methoden der Fernerkundung
- Teil 4: Monitoringkonzept: Ableitung eines Monitoringkonzepts anhand der Ergebnisse aus Teil 1, 2 und 3

2 Untersuchungsgegenstand

Die konkreten Auswirkungen von Solarparks auf die Biodiversität sind noch unzureichend erforscht (NABU 2021). Viele Autoren sehen ein großes Aufwertungspotential, wenn die Fläche zuvor intensiv landwirtschaftlich genutzt wurde und durch den Bau des Solarparks eine Extensivierung der Nutzung erreicht wurde (NABU und BUND Baden-Württemberg 2021; Raab 2015). Der tatsächliche Zustand der Biodiversität ist jedoch von vielen Faktoren der konkreten Ausgestaltung der Freiflächenanlage abhängig. Dazu zählt auf der einen Seite die bauliche Gestalt des Solarparks und auf der anderen Seite die Vielfalt der Habitatstrukturen und -bedingungen auf der Fläche. Nicht zuletzt beeinflussen der Standort und die Einbindung in die Umgebung das Potential für eine gesteigerte Artenvielfalt.

In den folgenden Kapiteln werden die Aspekte der naturräumlichen und technischen Ausstattung einer PV-Freiflächenanlage beschrieben, die im Rahmen der Studie als Untersuchungsgegenstand analysiert werden. Dazu werden zunächst die relevanten Habitate samt der zugehörigen FFH-Lebensraumtypen vorgestellt. Ebenso werden verschiedene naturschutzrelevante Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen beschrieben, die ebenfalls einen Einfluss auf die Biodiversität haben.

Schließlich werden die technischen Parameter eines Solarparks dargestellt, die mit Hilfe von Fernerkundungsmethoden analysiert werden können.

Untersuchungsgegenstand sind dabei PV-Freiflächenanlagen, die im vorliegenden Gutachten auch als "Solarparks" bezeichnet werden. Besondere Typen von Solaranlagen wie Agri-PV, Floating-PV auf Gewässerflächen oder Moor-PV werden hingegen nicht untersucht.

2.1 Habitats und Maßnahmen

Die Bandbreite möglicher Biotoptypen in Freiflächenanlagen ist relativ groß und reicht von Ruderalfluren über Heideflächen bis hin zu verschiedenen Grünlandtypen (vgl. auch Beschreibungen in Anlage 1, Kapitel 8). Innerhalb der Anlage können unterschiedliche Habitatelemente wie Gehölze, Sand-, Lesestein-, Totholzhaufen oder Kleinstgewässer integriert sein. Viele Biotoptypen werden in ihrer konkreten Ausprägung stark durch die menschliche Nutzung und Pflege geprägt (z. B. durch Beweidung, Mahd oder Nährstoff- und Schadstoffeintrag).

Entscheidend für die Auswirkungen auf die Biodiversität sowie das Aufwertungspotential ist der ökologische Wert einer Fläche beim Bau der Anlage. Bei Aufstellung auf einer zuvor extensiv genutzten Fläche können negative Effekte auftreten, da die Vegetationsstruktur und das Mikroklima durch den Eingriff verändert werden (Badelt u. a. 2020). Auf zuvor intensiv genutzten Acker- oder Grünlandflächen besteht hingegen ein großes Aufwertungspotential (Badelt u. a. 2020). Maßnahmen wie Extensivierung, Förderung der Strukturvielfalt, Ansaaten und Pflanzungen gebietsheimischer Wildpflanzenarten oder Förderung von Bestäuberinsekten können beispielsweise zu einer Steigerung der Biodiversität beitragen (NABU 2021). Durch eine extensive Bewirtschaftung entstehen offene und magere Standorte, die in unserer Kulturlandschaft immer seltener zu finden sind, jedoch wichtige Lebensräume für gefährdete Arten darstellen (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2019; Raab 2015).

Aus der Aufwertung einer Fläche können Synergieeffekte mit der Umgebung erwachsen. Beispielsweise können angrenzende landwirtschaftliche Flächen von dem Artenreichtum einer Freiflächenanlage hinsichtlich der Bestäubung oder der Schädlingskontrolle profitieren (Hietel, Reichling, und Lenz 2021). Gleichzeitig ist die bestehende Artenvielfalt in der Umgebung eines Solarparks entscheidend für die potentielle Steigerung der Biodiversität auf einer Fläche (Raab 2015). Erst durch das Vorhandensein von Quellbiotopen auf angrenzenden Flächen (Umkreis von 500 – 1000 m) können Arten aus der näheren Umgebung auf die Fläche einwandern (Badelt u. a. 2020).

2.1.1 Habitats

In der folgenden Tab. 1 werden die relevanten Habitats und Biotoptypengruppen des Offenlandes aufgeführt (Landesumweltamt Brandenburg 2007; Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie 2018). Ausgewählt wurden Biotoptypengruppen, die typischerweise unter Freiflächenanlagen auftreten (z. B. Gras- und Staudenfluren) oder auf dem Gelände einer Freiflächenanlage vorkommen können (z. B. Feuchtbioptope oder Gehölze). Die Tabelle enthält neben einer definitorischen Beschreibung auch die zugehörigen FFH-Lebensraumtypen (FFH-LRT). Diese Lebensräume haben nach der Flora-Fauna-Habitat-Richtlinie einen besonders hohen Schutzstatus und sind damit ein Indikator für wertvolle Naturschutzflächen (Bundesamt für Naturschutz 2023). Weitere Ausführungen zu den Biotoptypengruppen finden sich in Anlage 1 in Kapitel 8.

Tab. 1: Potentielle Biotoptypen und FFH-Lebensraumtypen in Freiflächensolaranlagen

Biotoptyp	Beschreibung	FFH-LRT
<i>Waldfreie Niedermoore und Sümpfe, Grünland nasser bis feuchter Standorte</i>		
Feuchtwiesen / Feuchtwiesen	Gemähtes oder beweidetes Dauergrünland ständig nasser bis feuchter meist in Niederungen gelegener Standorte, von Süß- und Sauergräsern dominiert, Ausprägung nach Nutzungsart und -intensität, bei extensiver Nutzung artenreich	6410
<i>Trockenrasen sowie Grünland trockener bis frischer Standorte, Äcker und Ackerbrachen</i>		
Frischwiesen / Frischweiden	Regelmäßig gemähte oder beweidete Grünlandflächen frischer Standorte, von Süßgräsern dominiert, bei extensiver Nutzung artenreich	6510
Trocken- und Halbtrockenrasen	Ungedüngte extensiv genutzte Grasfluren auf trockenen Standorten, Dominanz einzelner oder verschiedener Grasarten	2330, 6120, 6210, 6230, 6240, 6214
Intensivgrünland	Periodisch umgebrochenes Intensivgrasland feuchter bis frischer Standorte, das von einzelnen oder wenigen Arten dominiert ist, oft zum Anbau von Futtergräsern, regelmäßige Nutzung durch Beweidung oder Mahd	-
Grünlandbrachen	Grünlandflächen, die früher durch Mahd oder Beweidung genutzt wurden, auf Standorten unterschiedlicher Bodenfeuchte, schnelle Veränderungen der Vegetationsstruktur	6120, 6210, 6240, 6410, 6440, 6510, 6430
Ackerbrachen	Vorübergehend stillgelegte Anbauflächen oder jüngere Dauerbrachen, je nach Dauer der Nutzungsauffassung mehr oder weniger artenreich	-
<i>Wald- und Ufersäume, Staudenfluren</i>		
Staudenfluren und -säume	Flächen mit (hochwüchsigen) Stauden, auf Standorten unterschiedlicher Bodenfeuchte, oft entlang von Nutzungsgrenzen, z. B. entlang von Wegen, Straßen oder an den Rändern von Wäldern oder Gebüsch, uferbegleitend oder auf brachliegenden Feuchtwiesen	6430, 6510, 6240
<i>Felsen, Block- und Schutthalden, Geröllfelder, offene Bereiche mit sandigem oder bindigem Substrat</i>		
Block- und Felsschutthalden	Flächige von Blöcken, Platten oder Steinen aus Naturstein geprägte Hangpartien	-
Vegetationsfreie und -arme Rohbodenstandorte	Anthropogene Rohbodenstandorte mit fehlendem oder schütterem Pflanzenbewuchs, Deckungsgrad < 10 %, Untergliederung nach vorherrschendem Substrat	2330
Ruderales Pionier-, Gras- und Staudenfluren	Ruderalfluren oder ruderales Pionier- und Halbtrockenrasen, durch Sukzession auf vegetationsfreien Rohböden entstanden	-

Sonstige Spontanvegetation	Auf Sekundärstandorten entstandene Pflanzenbestände, die nicht zu den typischen Ruderalgesellschaften gehören, z. B. Seggen- oder Röhrichtbestände an künstlichen Böschungen oder in Baugruben	-
<i>Fließende Gewässer</i>		
Bäche und kleine Flüsse	Natürliche Fließgewässer mit meist mäßiger Strömung und geringer Breite (< 5 m)	3260
Gräben	Künstliche lineare Gewässer mit meist geringer Strömung und geringer Breite (< 5 m), oft Entwässerungsgräben	3260
<i>Stehende Gewässer</i>		
Perennierende Kleingewässer	Natürliche oder naturnahe ausdauernde Gewässer mit einer Größe < 1 ha, meist geringer Tiefe und unterschiedlicher Trophie, z. B. Sölle, Pfulde, Kolke, Tümpel, Weiher	3150, 3130, 3140
Temporäre Kleingewässer	natürliche und künstliche, periodisch oder unregelmäßig wasserführende Gewässer mit geringer Tiefe und Fläche, z. B. Tümpel, Lachen, Pfützen, Fahrspuren, Baugruben	3130
Teiche und kleine Staugewässer	kleine (< 1 ha) künstliche, ablassbare Gewässer mit geringer Tiefe (< 5 m), bis zum Grund belichtet, z. B. Fischteiche	3150, 3130, 3140
<i>Röhrichte</i>		
Röhrichtgesellschaften	Röhrichte an Fließ- oder Stillgewässern, Vorkommen bis maximal 2 m Wassertiefe, Unterscheidung in Groß- und Kleinröhrichte	3260, 3270
<i>Sonderbiotope</i>		
Steinhaufen und -wälle	Haufen von Feldsteinen in der Nähe von landwirtschaftlich genutzten Flächen	-
Trockene Gruben	Von Rohböden geprägte Grubenbereiche, nährstoffarm, meist stark gegliedertes Oberflächenrelief, oft mit ruderalen Pionierarten	-
<i>Feldgehölze, Gebüsche, Hecken und Gehölzkulturen</i>		
Flächige Laubgebüsche	Flächenhafte von Laubsträuchern geprägte Gebüsche auf Standorten unterschiedlicher Bodenfeuchte, normalerweise aus natürlicher Sukzession hervorgegangen, meist Licht liebende Arten	-
Feldgehölze	Naturnahe von Bäumen geprägte Gehölze bis 1 ha auf Standorten unterschiedlicher Bodenfeuchte, meist isoliert in der offenen Landschaft, oft Restwaldflächen	-
Hecken	Streifenförmige Feldgehölze mit einer Breite < 15 m, Gliederungs-elemente der Kulturlandschaft	-
Baumreihen	In regelmäßigen Abständen gepflanzte linienförmige Baumbestände	-
Solitärbäume und Baumgruppen	Einzelbäume oder Baumgruppen	-

Zwergstrauchheiden		
Zwergstrauchheiden	Unbewaldete von Zwergsträuchern oder Wacholdergebüsch dominierte Pflanzengesellschaften auf trockenen nährstoffarmen Standorten oder auf sauren Moorstandorten	2310, 4030, 4010, 5130

2.1.2 Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen

Durch verschiedene Naturschutzmaßnahmen können eine ökologische Aufwertung einer Freiflächenanlage erreicht und Entwicklungspotenziale ausgeschöpft werden (Bundesverband Solarwirtschaft e.V. und NABU 2021; Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende 2021; NABU 2021). In der nachfolgenden Tab. 2 sind alle relevanten Maßnahmen zur Pflege und Entwicklung der Biotope aufgeführt, die sich mit Fernerkundungsmethoden analysieren lassen.

Tab. 2: Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen in Freiflächensolaranlagen

Maßnahme	Beschreibung
<i>Pflegemaßnahmen</i>	
Mahd	Mechanische Entfernung von Vegetation zur Aushagerung und Auflichtung einer Fläche. Bei einer Mulchmahd wird das Schnittgut nach der Mahd nicht von der Fläche entfernt. Zeitpunkt und Häufigkeit der Mahd sind wichtige Indikatoren für den naturschutzfachlichen Wert des Grünlandes.
Beweidung	Haltung von Tieren auf Grünlandflächen
<i>Entwicklungsmaßnahmen</i>	
Anlage von Habitatalementen	Anlage von Gehölzen, Kleinstgewässern, Trocken- oder Feuchtbiotopen o. ä. zur Erhöhung der Strukturvielfalt

2.2 Technische Parameter

Die anlagebedingten Auswirkungen auf die Biodiversität wurden bereits in zahlreichen Studien untersucht (Badelt u. a. 2020). Je nach Gestaltung der Anlage können verschiedene positive oder negative Effekte auf die Flora und Fauna auftreten. Die relevanten technischen Parameter eines Solarparks mit Einfluss auf die Biodiversität sind in der nachfolgenden Tab. 3 aufgelistet. Ausgewählt wurden Parameter, die sich mit Fernerkundungsmethoden gut erkennen und analysieren lassen. Ausführlichere Beschreibungen sind im Kapitel 8 zu finden.

Tab. 3: Mit Fernerkundungsmethoden erkennbare technische Parameter von Freiflächensolaranlagen

Parameter	Beschreibung
Anlagengröße	Gesamtfläche der Freiflächenanlage
Reihenabstand	Abstand der Modulreihen
Überschirmter Anteil an Gesamtfläche	Anteil der Gesamtfläche, der durch die Solarmodule überschirmt ist
Höhe der Modultische	Höhe der aufgeständerten Solarmodule
Ausrichtung der Module	Himmelsrichtung, in die die Solarmodule ausgerichtet sind
Neigung der Module	Neigungswinkel der Solarmodule
Versiegelungsgrad	Versiegelungsgrad der Gesamtfläche

3 Daten

3.1 Referenzdaten

Referenzdaten sind eine wichtige Grundlage zum Training und zur Validierung von Fernerkundungsmodellen. Das Ziel bei der Zusammenstellung der Referenzdaten ist es, Trainingsdaten für alle zu erwartenden Lebensraum- und Biotoptypen sowie künstlichen Materialien (z. B. Solarmodule oder versiegelte Flächen) zu finden. Je mehr Referenzdaten in ein Fernerkundungsmodell einfließen, desto valider sind die Vorhersagen des Modells. Es bietet sich daher an, Daten aus allen verfügbaren Quellen zu verwenden. Dies können bestehende Daten z. B. aus Biotopkatastern, Biodiversitätsmonitorings oder Landwirtschaftsdatenbanken sein, aber auch neu erhobene Referenzdaten, die im Rahmen einer Luftbildinterpretation oder terrestrischen Kartierung aufgenommen werden.

Um eine umfassende und überregionale Auswertung von Ergebnissen zu ermöglichen, ist eine einheitliche Erfassung, Speicherung und Bearbeitung der Referenzdaten die Basis. Allerdings liegen die für das Monitoring der Vegetationsentwicklung in Solarparks verwendbaren Daten oft in heterogenen Strukturen, Formaten und Skalierungen vor, was die Ableitung auf nationaler Ebene erschwert. Daher müssen im Rahmen des Datenmanagements für das Monitoring-Konzept Mindestanforderungen an die Qualität der harmonisierten Datenerhebung, -speicherung und -bereitstellung erarbeitet und in das Konzept als datentechnische Anforderungen integriert werden.

3.1.1 Bestehende Monitoringprogramme

Es gibt bereits eine Vielzahl an nationalen und regionalen Monitoringprogrammen, die sinnvoll nutzbar wären, um eine verlässliche Referenz-Datengrundlage zu schaffen. Besonders hilfreich erscheinen folgende Programme, die teils schon seit geraumer Zeit in festgelegten Stichprobenflächen Daten sammeln:

- High Nature Value Farmland-Indikator - HNV (Benzler 2018) auf den bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen (BRSF)

Das HNV-Farmland-Monitoring basiert auf repräsentativen Stichprobenflächen in ganz Deutschland, welche auch für das Monitoring häufiger Brutvögel verwendet werden. In einem Zeitraum von vier Jahren werden etwa 1.700 Stichprobenflächen untersucht, die alle Offenlandstrukturen in der Agrarlandschaft mit hoher Arten- oder Strukturvielfalt umfassen. Dazu gehören Nutzflächen, Landschaftselemente und Strukturen, welche einer standardisierten Bewertung unterzogen werden. Die Bewertung erfolgt durch die Erfassung bestimmter Pflanzenarten als Indikatoren für eine Mindestvielfalt oder extensive Nutzung.

Noch im Aufbau befindlich, aber potenziell eine wertvolle Datengrundlage stellt das

- Ökosystem-Monitoring (ÖSM) des BfN dar (Bundesamt für Naturschutz 2021).

Hier werden auf den gleichen HNV-Stichprobenflächen die Biotoptypen und ihre Ausprägung flächendeckend erfasst.

Des Weiteren sind auch flächendeckende Programme der Länder von Interesse, diese sind jedoch oft regional unterschiedlich verfügbar und nicht überall ohne Weiteres vergleichbar:

- Biotoptypenkartierung der Länder
- Integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem (INVEKOS - Daten zur Agrarnutzung)
- Auch langfristige Programme von Forschungseinrichtungen könnten wertvolle Daten liefern, z. B. Daten der Biodiversitätsexploratorien (Senckenberg)

Besonders interessant sind hier die erhobenen Daten zur Landnutzungsintensität (z. B. Mahdhäufigkeit).

Ebenfalls noch im Aufbau befindlich, aber potenziell eine wertvolle Datengrundlage stellen Daten von Zertifizierungsorganisationen dar:

- z. B. EULE: Evaluierungssystem für eine umweltfreundliche und landschaftsverträgliche Energiewende (regionalwerke GmbH & Co. KG 2023)

Des Weiteren könnten Daten aus Citizen Science Projekten eine wertvolle Referenzgrundlage bilden:

- z. B.: Floralncognita (Technische Universität Ilmenau 2023)

3.1.2 Luftbildinterpretation

Neben der Nutzung bestehender Datengrundlagen ist es ebenso möglich, Referenzdaten neu zu erheben. Dies kann beispielsweise im Rahmen einer stereoskopischen Luftbildinterpretation geschehen. Dabei werden Trainingsflächen in Color-Infrarot-Luftbildern (CIR) identifiziert und manuell als Polygonflächen abgegrenzt. Eine Voraussetzung für die Luftbildinterpretation ist das Vorliegen von aktuellen RGBI-Luftbildern mit einer Auflösung von 10 - 20 cm, die möglichst in den Sommermonaten aufgenommen wurden.

Eine Luftbildinterpretation ermöglicht eine relativ unkomplizierte Aufnahme von Trainingsdaten in größeren Arealen. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass die Daten unmittelbar digital vorliegen und in das Fernerkundungsmodell eingepflegt werden können.

3.1.3 Terrestrische Kartierung

Eine weitere Möglichkeit zur Erfassung von Referenzdaten ist eine terrestrische Kartierung. Im Rahmen einer Geländebegehung werden dominanzbildende Arten und strukturell einheitliche Artmosaik bzw. Pflanzengesellschaften oder Biotoptypen vegetationskundlich erfasst. Die Kartierung wird im Nachgang digitalisiert oder direkt mit einem digitalen Field-Mapping System gespeichert.

Als Vorbereitung der terrestrischen Kartierung sollten zunächst Informationen sowohl über den Naturraum als auch den Solarpark eingeholt werden. Beispielsweise ist von Interesse, ob ein Zielplan für die Anlage existiert, der konkrete Leit- und Zielarten festlegt. Zu Beginn der Kartierarbeiten muss weiterhin festgelegt werden, welcher Interpretationsschlüssel für die vegetationskundliche Erfassung verwendet wird. Bisher gibt es keine bundesweit einheitlichen Standards für die Klassifikation und Erfassung von Biotoptypen. Jedes Bundesland führt eigene methodische Vorgaben und Kartierschlüssel für die Biotoperfassung.

Ziel der terrestrischen Kartierung ist es, möglichst viele der voraussichtlich zu erwartenden Biotoptypen und Landschaftselemente sowie Pflanzengesellschaften und Dominanzarten zu erfassen. Für jeden Standort wird die vegetationskundliche Erfassung in einem Standortbogen und durch Fotoaufnahmen dokumentiert. Die Anzahl der notwendigen Geländepunkte ist von der Qualität der verwendeten Fernerkundungsdaten und der Wahl des spezifischen Modells zur Biotopklassifizierung abhängig.

3.2 Fernerkundungsdaten

Die Fernerkundung ist eine wichtige Methode, um die Landoberfläche zu überwachen und zu kartieren. Die Technologie ermöglicht es, Informationen aus der Luft oder aus dem Weltraum zu sammeln und diese dann zu analysieren, um verschiedene Eigenschaften der Erdoberfläche abzuleiten, wie zum Beispiel die Vegetationsbedeckung.

Die wichtigsten Technologien der Fernerkundung sind die optische Bildgebung, die Radarbildgebung und die LiDAR-Technologie. Optische Bilder können verwendet werden, um die Pflanzendecke und andere Merkmale der Landschaft zu kartieren, während Radardaten helfen können, Informationen über den Bodentyp und die Feuchtigkeit zu sammeln. LiDAR-Daten werden verwendet, um dreidimensionale Modelle der Landschaft zu erstellen, die wiederum genaue Informationen über die Höhe der Vegetation und die Topographie liefern können.

Die Beobachtung raum-zeitlicher Veränderungen von Biotopen und Biotopkomplexen sowie ihrer Nutzungsaspekte ist u.a. abhängig von natürlichen Prozessen der Vegetationsdynamik. Verschiedene Sensoren sind für unterschiedliche Aspekte des Monitorings von Solarparks geeignet.

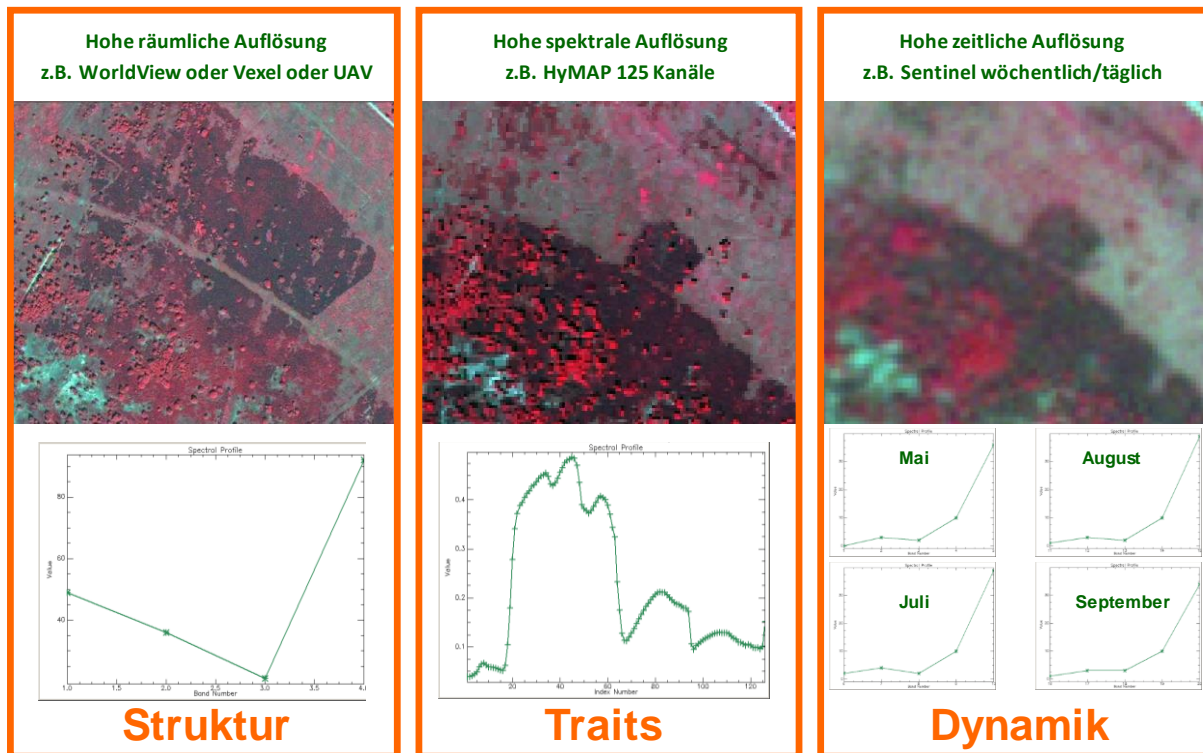


Abb. 1: Zusammenhang zwischen Auflösung des Sensors und Klassifikation von Vegetationseigenschaften (Quelle: LUP)

3.2.1 Zeitlich hoch aufgelöste Satellitendaten

3.2.1.1 Copernicus-Satellitendaten

Eine Biotoptypen-Klassifikation kann durch die Einbeziehung von multitemporalen und multispektralen Satellitendaten unterstützt werden. Seit 2015 sind kostenfreie Sentinel-2 Daten verfügbar, die im Rahmen des Erdbeobachtungsprogramms Copernicus von der Europäischen Weltraumorganisation (European Space Agency - ESA) über den Copernicus Open Access Hub (<https://scihub.copernicus.eu/>) heruntergeladen werden können. Die zwei identisch aufgebauten Sentinel-2 Satelliten (S2A und S2B) umkreisen auf gleicher Umlaufbahn, jedoch um 180 Grad versetzt, die Erde und sind somit in der Lage, jeden Punkt auf der Erdoberfläche alle drei bis fünf Tage abbilden zu können. Durch die hohe temporale Auflösung eignen sich die Sentinel-2 Satelliten besonders gut für Monitoringaufgaben. Gleichzeitig liefern sie Daten in 12 spektralen Kanälen unterschiedlicher Breite (siehe Abb. 2), mit denen verschiedenste Parameter der Erdoberfläche gemessen oder abgeleitet werden können.

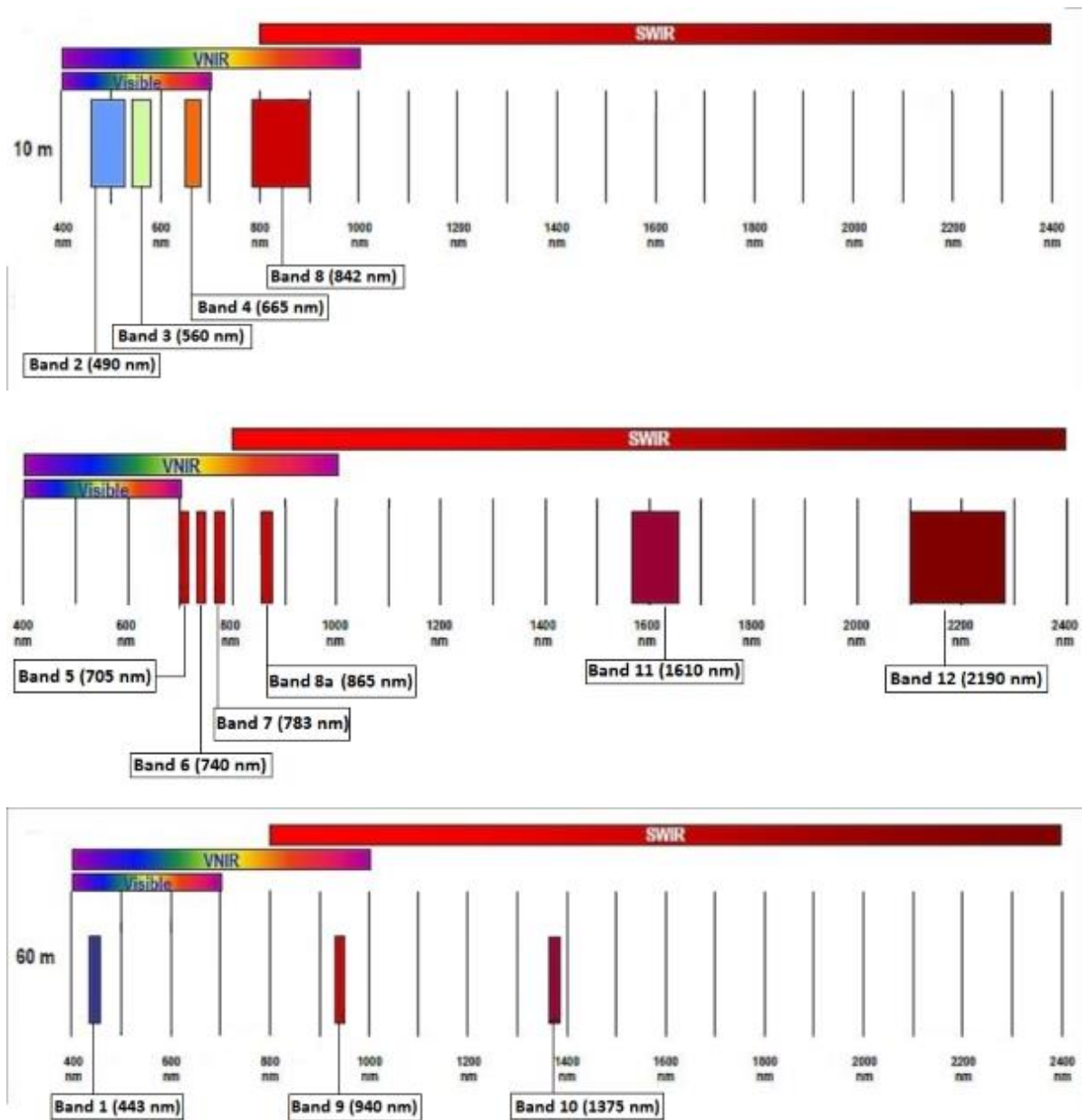


Abb. 2: Sentinel-2 Spektralkanäle sortiert nach räumlicher Auflösung, oben: 10 m, Mitte: 20 m, unten: 60 m (Quelle: ESA)

Die Daten der verschiedenen Spektralkanäle werden zeilenbasiert in verschiedenen Auflösungen registriert. Nur die Kanäle im sichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums (blau, grün und rot) sowie im nahen Infrarot (Band 8) werden mit 10 m Bodenaufklärung aufgenommen, alle anderen Spektralkanäle werden in 20 m oder 60 m registriert.

Der große Vorteil der Sentinel-2 Satellitendaten liegt in der Abbildung dynamischer Entwicklungen.

Der Nachteil der Sentinel-2 Satellitendaten liegt in der räumlichen Auflösung von 10 m, die einen geringeren Detailgrad zur Folge hat. Dies führt insbesondere bei heterogenen und kleinteiligen Biotopmosaiken zu Schwierigkeiten. Zusätzlich können Klassifikationsfehler in diesen Bereichen durch Bildpunkte mit gemischten Spektralinformationen (Mischpixel) vorkommen.

Die Sentinel-1 Satelliten sind ebenfalls Teil des Copernicus-Programms der ESA. Sie verwenden ein Radar (Synthetic Aperture Radar, SAR), welches unabhängig von Wetterbedingungen Bilder der Erdoberfläche erzeugen kann. Das Radar sendet elektromagnetische Impulse mit verschiedenen Polarisationen (VV und VH) aus, die von der Erdoberfläche reflektiert werden und dann vom Satelliten empfangen werden. Es gibt verschiedene Sentinel-1 Datenprodukte, die auf Basis der vom Satelliten empfangenen Signale und den daraus erzeugten Bildern erstellt werden. Die für Klassifikationen im Sinne der Fragestellung wichtigsten Sentinel-1 Datenprodukte sind:

1. GRD- und SLC-Backscatter-Daten: Diese Daten enthalten Informationen über die reflektierte Energie von der Erdoberfläche.
2. Interferometrische Daten: Diese Daten enthalten Informationen über die Veränderungen in der Erdoberfläche, die durch Interferometrie (eine Technik zur Messung kleiner Veränderungen) erfasst wurden. Sie werden verwendet, um Veränderungen in der Höhe, Deformationen und Bewegungen von Objekten auf der Erdoberfläche zu erkennen.

Je nach Modus gibt es verschiedene räumliche Auflösungsstufen, die von 10 x 10 m (Abb. 3 und Abb. 4) bis zu 40 x 40 m reichen können. Die zeitliche Auflösung ist sehr hoch, nahezu täglich sind Aufnahmen möglich (abhängig vom Breitengrad).



Abb. 3: Komposit aus drei verschiedenen Aufnahmezeitpunkten (Sentinel-1 GRD-IW-VV Daten), schwarz: Wasserflächen, weiß: Gebäude, bunt: Ackerflächen, hellgrau: Wald (Quelle: LUP GmbH)

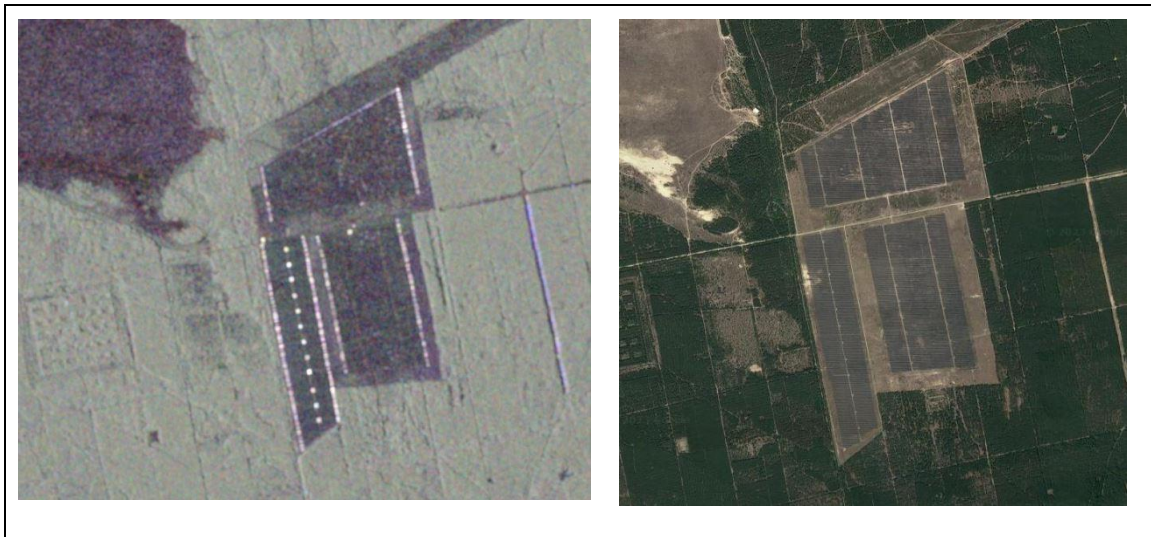


Abb. 4: Solarparks sind in Sentinel-1 Bildern gut an den gleichmäßig verteilten Trafostationen zu erkennen, die das Radarsignal stark reflektieren (links: Sentinel-1 GRD-IW-VV Daten), weiße Punkte: Trafostationen, hellgrau: Wald; rechts: Luftbild (Quelle: LUP GmbH)

3.2.2 Spektral sehr hoch aufgelöste Satellitendaten

Daten mit einer sehr hohen spektralen Auflösung haben den Vorteil einer detaillierten Abbildung von biochemischen Pflanzeigenschaften, wie Wassergehalt oder Pigmentierung, über die ein Rückschluss auf Artenzusammensetzung und Vitalität getroffen werden kann.

Hyperspektraldaten waren bis in die 2000er Jahre ausschließlich durch flugzeuggetragene Systeme erhältlich. Mittlerweile gibt es aber Sensoren, die sowohl für Drohnen verfügbar sind, als auch Satellitendaten. Dabei stellt der Sensor EnMAP (Environmental Mapping and Analysis Program), welcher seit April 2022 Daten liefert, besonders hochwertige Daten zur Verfügung. Es werden Aufnahmen mit 230 Bändern in den Wellenlängen von 420 nm bis zu 2450 nm erstellt. Leider ist die räumliche Auflösung auf 30 m begrenzt, was die Anwendung für eine Vegetationserkennung in Solarparks nur eingeschränkt ermöglicht. Trotzdem sollten EnMAP-Daten auf ihr Einsatzpotential vertieft untersucht werden, da es auch in Zukunft weitere hyperspektrale Satellitenmissionen geben wird (Sentinel 10 - CHIME ab 2029).

3.2.3 Räumlich hochauflösende Daten

3.2.3.1 Digitale Orthofotos

Digitale Orthofotos sind verzerrungsfreie und maßstabsgetreue Luftbilder, die die Erdoberfläche lagerichtig abbilden. Die Luftbildaufnahmen werden mithilfe von Geländemodellen entzerrt. Digitale Orthofotos decken zwar lediglich vier Spektralkanäle ab (Rot, Grün, Blau und nahes Infrarot - RGBI), sind aber mit einer räumlichen Auflösung von 10 bis 20 cm deutlich schärfer als Sentinel-2-Aufnahmen.

Ihr Nutzen für das Projekt ist stark abhängig vom Aufnahmezeitpunkt. Für eine erfolgreiche Segmentierung und Klassifizierung von Dominanzarten, Landschaftselementen oder Biotoptypen im Offenland ist eine räumlich möglichst hoch aufgelöste Datengrundlage aus der sommerlichen Vegetationsperiode nötig.

Das folgende Beispiel in Abb. 5 verdeutlicht den Unterschied zwischen verschiedenen Auflösungsstufen von Satellitenbilddaten und Digitalen Orthofotos.



Abb. 5: Beispiel unterschiedlicher räumlicher Auflösungsstufen in einer Zeitreihe von 2005 bis 2021 (Solarpark bei Lieberose) (Quelle: LUP GmbH)

3.2.3.2 Kommerzielle, räumlich höchstaflösende Daten

Neben Luftbildern gibt es eine Reihe von kommerziellen, räumlich sehr hochauflösenden Satelliten. Das momentan meistgenutzte System ist WorldView 3, welches mit 0.31 m räumlicher Auflösung und 16 Kanälen im sichtbaren, nahem Infrarot und kurzwelligem Infrarot eine sehr gute Grundlage zur Erkennung von Vegetationstypen bildet. Hiermit können beispielsweise Heidegesellschaften und deren Erhaltungszustand abgeleitet werden (Förster u. a. 2008). Aber auch für die Erkennung und das Monitoring anderer kleinräumiger Biotoptypen sind räumlich höchstaflösende Satelliten sehr gut geeignet. Leider sind die Datenkosten mit denen einer Luftbildbefliegung durchaus vergleichbar und die Sicherheit der Akquise einer aktuellen Aufnahme ist nicht immer gegeben. Eine weitere kommerzielle Datenquelle sind Planet Dove-Daten mit einer Auflösung von 3 bis 5 m oder Planet SkySat-Bilder mit einer Auflösung bis zu 1 m, die nahezu täglich Aufnahmen liefern können. Diese Daten können eine interessante Alternative oder Ergänzung zu Sentinel-Daten sein, falls sie z. B. über Bundes- oder Landesämter lizenziert werden.

3.2.3.3 UAV-Befliegung 2,5 oder 5 cm

Drohnenaufnahmen können die Möglichkeiten einer fernerkundlichen Biotoptypen- und LRT-Kartierung stark verbessern. Zum einen ist flächendeckend eine räumliche Auflösung von 5 - 6 cm möglich. Bei gezielter Befliegung von Teilbereichen des Untersuchungsgebietes ist die Erstellung noch schärferer Szenen (2,5 cm) möglich. Damit können Dominanz bildende Arten und Pflanzengesellschaften im Offenland noch genauer erfasst werden.

Ein Nachteil der UAV-Befliegung ist die Pflicht zur Genehmigung, die gerade in der Hauptvegetationszeit aus Artenschutzgründen oft nicht erteilt wird. So ist unter Umständen eine UAV-Befliegung erst Ende Juli oder noch später im August möglich. Dies kann für die terrestrische Kartierung und die Klassifikation suboptimal sein, da je nach Witterung die Offenlandvegetation bereits stark vertrocknet sein kann.

In den letzten Jahren haben Drohnen im Naturschutzbereich stark an Einsatzmöglichkeiten und Nachfrage gewonnen (Fluhr-Meyer und Döring 2023).

3.2.4 Oberflächenmodelle und Geländemodelle

Gelände- und Oberflächenmodelle sind wichtige Datengrundlagen, um sowohl die Topographie der Erdoberfläche als auch die Höhe der auf ihr befindlichen Objekte, z. B. der Solarmodule, zu analysieren. Zwei verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung von Oberflächenmodellen sind verfügbar. Zum einen können mittels Laserscanning (LIDAR) Punktwolken und damit 3D-Informationen der Oberfläche erzeugt werden.

LIDAR steht für "Light Detection and Ranging" und ist eine Technologie, die Laserimpulse verwendet, um Entfernungen zu messen. Es ähnelt damit der Radartechnologie, verwendet jedoch Lichtwellen anstelle von Radiowellen, um Objekte zu erfassen.

Zum anderen sind Oberflächenmodelle auch anhand überlappender Stereo-Luftbildaufnahmen mit Hilfe von Matching-Verfahren automatisiert ableitbar. Letzteres wird immer häufiger als Datenprodukt bei der routinemäßigen Landesbefliegung erzeugt und neben den Orthofotos zur Verfügung gestellt. Üblicherweise haben Oberflächenmodelle aus LIDAR-Erfassung einen Höhenfehler von ± 15 cm, bildbasierte Oberflächenmodelle sind etwas ungenauer mit ± 50 cm.

Ein Digitales Geländemodell (DGM) stellt die Geländehöhe dar. Aus der Analyse des Reliefs lassen sich wichtige Rückschlüsse beispielsweise auf die vorherrschende Bodenfeuchte ziehen.

Ein Digitales Oberflächenmodell (DOM) beschreibt die Höhe der auf der Erdoberfläche befindlichen Objekte (z. B. Gebäude, Vegetation, Straßen etc.). Da die Geländehöhe nicht konstant ist, kann aus dem DOM noch nicht die absolute Objekthöhe abgeleitet werden. Dazu ist ein normiertes digitales Oberflächenmodell (nDOM) nötig, das die absolute Objekthöhe darstellt.

Das nDOM wird berechnet, in dem die Werte des DGM vom DOM abgezogen werden:

$$\text{nDOM} = \text{DOM} - \text{DGM}.$$

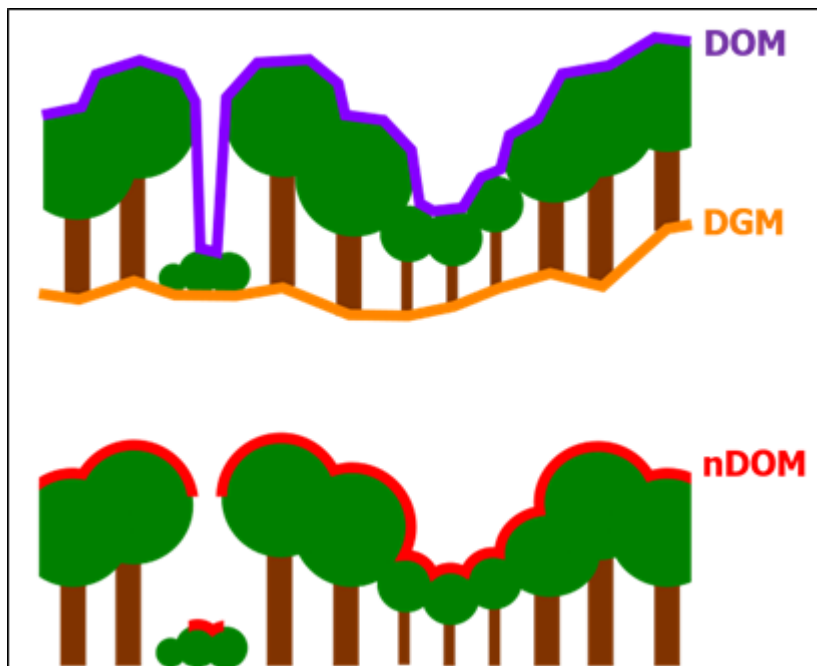


Abb. 6: Unterschied zwischen Digitalem Oberflächenmodell (DOM), Digitalem Geländemodell (DGM) und normiertem digitalem Oberflächenmodell (nDOM) (Quelle: LUP GmbH)

Mithilfe der absoluten Objekthöhen aus dem nDOM lassen sich je nach räumlicher Auflösung der Daten sowohl die Vegetationsstruktur und insbesondere die Vegetationshöhe als auch die technische Ausgestaltung der Solaranlage analysieren.

3.3 Datenverfügbarkeit und Kosten

Bei der Auswahl der Fernerkundungsdaten für ein Monitoring müssen verschiedene Aspekte abgewogen werden (vgl. Tab. 4). Kostenlos verfügbare Daten gehen nicht immer mit der nötigen Detailtiefe einher, wodurch die Klassifikationsgüte gemindert ist. Bei der Erhebung neuer Daten muss der finanzielle Aufwand mit dem erzielbaren Nutzen abgewogen werden. Auch die Frage nach der praktischen Umsetzung aufgrund äußerer rechtlicher Vorgaben muss bedacht werden.

Tab. 4: Übersicht der verschiedenen Trägersysteme

	Vorteile	Nachteile
Drohnen (UAVs)	Sehr detailreiche Aufnahmen Gute Abbildung der Struktur von Objekten	Genehmigungsintensiv Geringe Abdeckung von Flächen
Flugzeuge	Detailreiche Aufnahmen Gute Gebietsabdeckung, oft Stereoaufnahmen und damit 3D-Information	Recht teuer in der Beauftragung, oft nicht lizenzfrei verfügbar, Befliegungszeitraum manchmal ungünstig (unbelaubt)
Satellitendaten (höchstauflösende, z. B. WorldView)	Detailreiche Aufnahmen Gute spektrale Abdeckung	Oft nur kleine Flächen Tasking kompliziert (man bekommt nicht immer einer Aufnahme zum gewünschten Zeitpunkt)
Satellitendaten (Mapper, z. B. Sentinel)	Sich häufig wiederholende Aufnahmen (multi-temporal) Geringe Kosten, oft kostenfrei	Räumlich weniger gut aufgelöste Aufnahmen

Alle verwendbaren Fernerkundungsdaten (gruppiert nach räumlicher, zeitlicher und spektraler Auflösung) wurden für alle Bundesländer recherchiert und aufgelistet. Die entsprechende Tabelle ist in Anlage 2 (vgl. Kapitel 9) aufgeführt. Die Auflistung enthält für alle Datenarten die Datenverfügbarkeit und die zu erwartenden Datenkosten sowie die Links zu den Beschreibungen der Datenquellen bzw. bei freier Verfügbarkeit die Links zu den Downloadseiten.

In der folgenden Abbildung ist als Ergebnis der Recherche eine Übersicht zur Verfügbarkeit und Aktualität von Luftbildern in allen Bundesländern dargestellt (vgl. Abb. 7). Es ist erkennbar, dass insbesondere in den ostdeutschen Bundesländern (außer Mecklenburg-Vorpommern) sowie in Hessen, Nordrhein-Westfalen und Hamburg die Datenverfügbarkeit sehr gut ist und Daten kostenfrei über Download-Dienste bereitgestellt werden. In allen anderen Bundesländern sind die Daten nur teilweise oder gar nicht frei verfügbar. Die Bereitstellungskosten schwanken dabei je nach Bundesland.

Die Aktualität der Luftbilddaten steht nicht in Zusammenhang mit der Verfügbarkeit. Die überwiegende Anzahl der Bundesländer stellt die Luftbilddaten in einem Aktualisierungszyklus von 1-2 Jahren bereit. Lediglich in Brandenburg, Bremen, Hamburg, Niedersachsen, Rheinland-Pfalz und Sachsen werden die Luftbilddaten in einem größeren Abstand (>2 Jahre) aktualisiert.

Verfügbarkeit und Aktualisierungszyklen von Luftbilddaten und Oberflächenmodellen

Verfügbarkeit und Aktualisierung

- Daten frei verfügbar, Aktualisierungszyklus: 1-2 Jahre
- Daten frei verfügbar, Aktualisierungszyklus: >2 Jahre
- Daten teilweise frei verfügbar, Aktualisierungszyklus: 1-2 Jahre
- Daten teilweise frei verfügbar, Aktualisierungszyklus: >2 Jahre
- Daten nicht frei verfügbar, Aktualisierungszyklus: 1-2 Jahre
- Daten nicht frei verfügbar, Aktualisierungszyklus: >2 Jahre

Bearbeitung:
LUP GmbH
Große Weinmeisterstraße 3A
14469 Potsdam

Stand:
02.05.2023

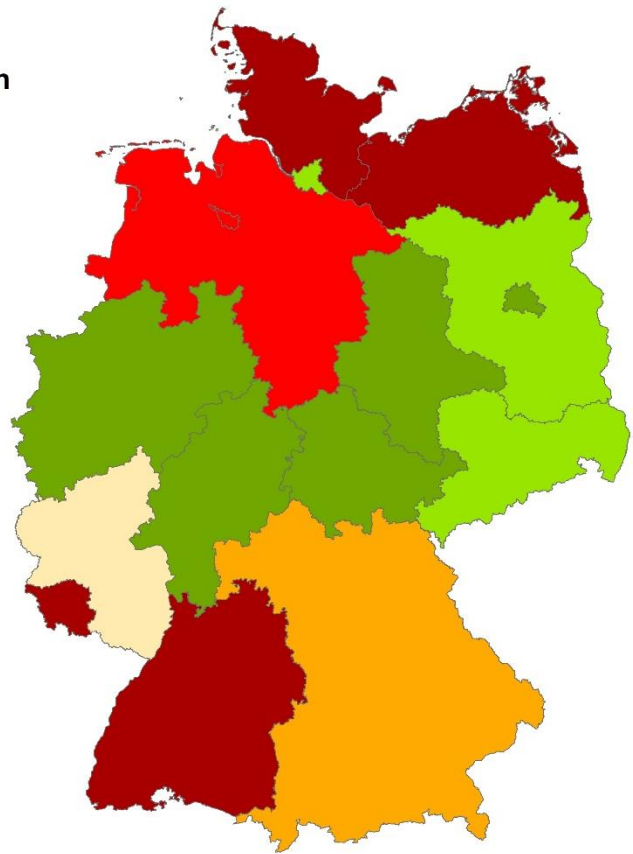
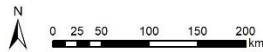


Abb. 7: Übersicht zur Verfügbarkeit und Aktualität von Luftbildern in allen Bundesländern (Quelle: LUP GmbH)

4 Stand der Forschung: Biodiversitätsmonitoring mit Fernerkundung

Fernerkundung zur Erfassung der Biodiversität ist seit mehreren Jahrzehnten ein stetig wachsendes Forschungsfeld (Corbane u.a. 2015). Vor allem in den letzten Jahren hat es durch die rapide Verbesserung der digitalen Sensoren, die immer größere Anzahl an operationellen Aufnahmesystemen und die immer leistungsfähigeren Auswertungsalgorithmen einen starken Schub gegeben.

Fernerkundungstechniken für das Monitoring der Biodiversität können prinzipiell in vier Klassen eingeteilt werden: i) direkte Kartierung der Artenverteilung, ii) Habitatkartierung für die Modellierung der Artenverteilung, iii) Abschätzen der funktionellen Diversität über Pflanzeigenschaften (sogenannte plant traits) und iv) direkte Ableitung der Biodiversität aus Spektraldaten (Rossi u.a. 2021). Vor allem im Bereich der Habitatkartierung gibt es viele operationelle Verfahren und eine lange Tradition der Verwendung von Fernerkundungsdaten. So werden bereits seit vielen Jahren vor allem räumlich sehr hoch aufgelöste Fernerkundungsdaten in Form von Luftbildern für das Monitoring von Biotoptypen und Landnutzungen für verschiedene Belange in Bundes- und Landesbehörden eingesetzt.

Das umfassendere Thema Biodiversität und satellitengestützte Fernerkundung ist ebenfalls schon seit geraumer Zeit Gegenstand von zahlreichen Untersuchungen und globalen Initiativen wie z. B. der Group on Earth Observations Biodiversity Observation Network (GEO BON 2023). Dafür werden zunehmend räumlich mittel aber zeitlich oder spektral sehr hoch aufgelöste Satellitendaten verwendet, um Parameter und Indikatoren abzuleiten, die es ermöglichen, die Biodiversität räumlich flächendeckend zu erfassen (Pinto-Ledezma und Cavender-Bares 2021), Trends zu beobachten (Cavender-Bares, Gamon, und Townsend 2020), das Ausmaß anthropogener Einflüsse zu quantifizieren (Hansen u. a. 2013) oder Essential Biodiversity Variables (EBVs) zu erfassen (Jetz u. a. 2019).

Die Mitgliedstaaten werden in der Biodiversitätsstrategie EU 2030 aufgefordert, die biologische Vielfalt und die Ökosystemleistungen digital zu kartieren und zu bewerten. In den Anfängen dieser Entwicklung (seit den 1980er Jahren) wurden dafür stereoskopische Luftbilder manuell ausgewertet und beispielsweise Informationen über Biotoptypen oder den Waldzustand flächendeckend mit Hilfe von Luftbildinterpretation abgeleitet. Seit dem Ende der 1990er Jahre werden auch in Deutschland verstärkt Daten und Methoden der digitalen Satellitenfernerkundung für das Monitoring von Schutzgebieten verwendet. Besonders interessant sind hier Hilfen zur Erfüllung der Berichtspflichten für FFH-Gebiete (Förster u. a. 2008).

Für die Analyse von Heideflächen wurde z. B. eine wissenschaftliche Methodik auf Grundlage der räumlich sehr hoch auflösenden QuickBird Satellitendaten (0,5 m) entwickelt (Förster u. a. 2008), welche inzwischen auch mit Erfolg auf andere Sensoren und Lebensraumtypen, wie beispielsweise Moorstandorte übertragen wurde (Frick u. a. 2011). Dabei werden Trainingsinformationen in einer Wissensbasis zusammengefasst, welche u. a. spektrale und textuelle Charakteristika und bei Bedarf zusätzliche Geodaten (z. B. zum Relief) beinhaltet. Mit diesen Informationen können überwachte Klassifikationsalgorithmen trainiert werden, sodass flächendeckende Aussagen zur räumlichen Verteilung von relevanten Biotopelementen (z. B. Gehölzanteile) erzielt werden, die nachfolgend für wiederholte Teilzustandsbewertungen im Sinne der FFH-Richtlinie verwendet werden können (siehe Abb. 8).

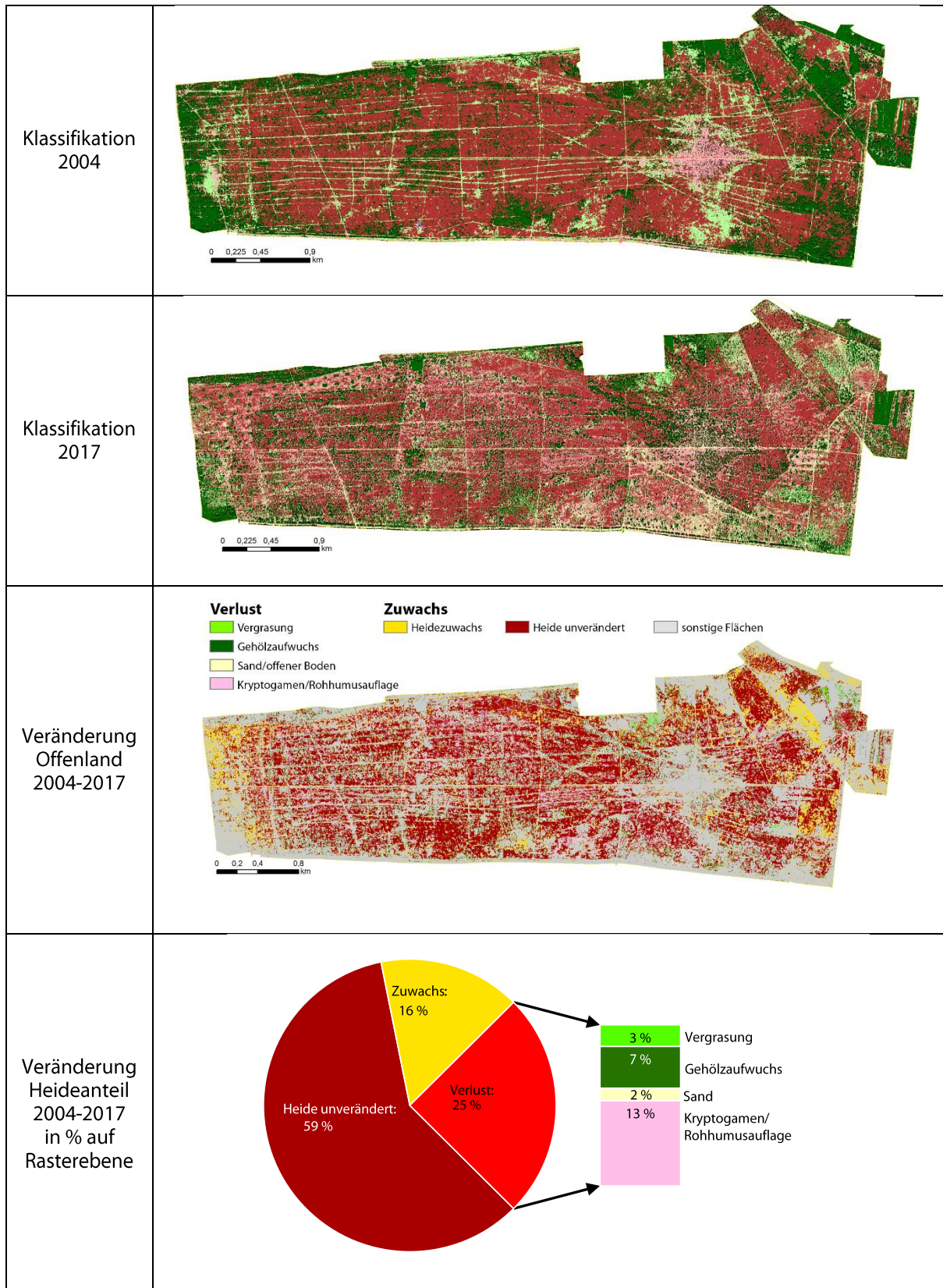


Abb. 8: Beispiel der Entwicklung von Heidefläche mit räumlich sehr hoch aufgelösten Daten zwischen 2004 und 2017 im FFH-Gebiet Reicherskreuzer Heide (Quelle: LUP GmbH)

Die Informationen, die durch die Fernerkundung gewonnen werden können, entsprechen allerdings nicht denen einer Feldkartierung. So geben Satellitendaten zwar konkrete Werte zur spektralen Reflektanz oder Oberflächenstruktur der Vegetation, aber nicht deren taxonomischen Merkmalen. Daher können Fernerkundungsdaten in der Regel nur Indikatoren für Biodiversität abbilden oder ableiten. Nicht für alle Ebenen und Aspekte der Biodiversität sind also Beiträge der Fernerkundung nutzbar. Besonders Parameter und Indikatoren, die die Struktur und Funktion von Habitaten und Ökosystemen abbilden, haben sich jedoch als relevant und mit hoher Genauigkeit fernerkundlich erfassbar erwiesen (Kattenborn u. a. 2021; Skidmore u. a. 2021).

Generell können drei Datenarten für das Biodiversitätsmonitoring verwendet werden (siehe genauere Beschreibung im Kapitel 3.2). Während räumlich sehr hochauflösende Daten häufig zur Erkennung von einzelnen Objekten und Biotoperelementen (z. B. Hecken, Lesesteinhaufen) und Dominanzarten verwendet werden, bieten sich Multitemporalaufnahmen an, um Änderungen in Zustand oder Nutzung (z. B. Mahdereignisse) und deren Intensität zu erkennen (Reinermann u. a. 2022). Hyperspektrale Daten können Hinweise über die biophysikalischen Eigenschaften einzelner Biotope und Biotoperelemente geben und somit auch zur Unterscheidung von Arten beitragen. In der Praxis sind aber bisher vor allem räumlich und zeitlich hochauflösende Daten von großer Relevanz, die hyperspektrale Sensoren sind zumeist noch nicht operationell verfügbar.

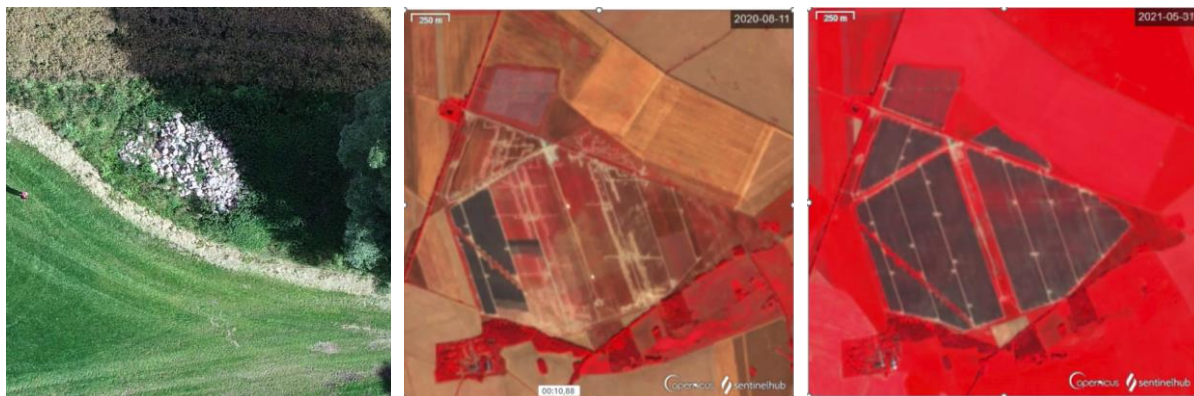


Abb. 9: links: Lesesteinhaufen in räumlich sehr hoch auflösender Drohnenaufnahme (Quelle: LUP), rechts: zeitliche Entwicklung des Solarparks Weesow-Willmersdorf zwischen 2020 und 2022 mit Sentinel-2 Daten (Quelle: Sentinel Hub)

Schneller technischer Fortschritt und elektronische und optische Verbesserung im Bereich der Fernerkundung mit unbemannten Fluggeräten wie Drohnen konnten in den letzten Jahren die räumliche und zeitliche Abdeckung für das Biotopmonitoring erhöhen sowie Kosten senken. Ein weiterer Vorteil von Drohnendaten ist die hohe räumliche Auflösung, da die zu untersuchenden Flächen häufig sehr kleinteilig sind und eine hohe Heterogenität aufweisen. Von anfänglichen RGB Drohnenaufnahmen über multispektrale bis zu hyperspektralen Aufnahmen konnten starke Zusammenhänge zwischen den Fernerkundungsdaten und bio-physikalischen Vegetationsparametern nachgewiesen werden (Capolupo u. a. 2015). Besonders die Erfassung von Blühaspekten ist in diesem Zusammenhang von großem Interesse, so konnten Barnsley, Lovett und Dicks (2022) zeigen, dass multispektrale Luftbildaufnahmen mit räumlichen Auflösungen von 3 cm und 7 cm verwendet werden können, um fünf nektarreiche Blütenpflanzenarten (*Prunus spinosa*, *Crataegus monogyna*, *Rubus fruticosus*, *Silene dioica* und *Centaurea nigra*) mit hoher Genauigkeit (>90%) zu klassifizieren (vgl. Abb. 10).

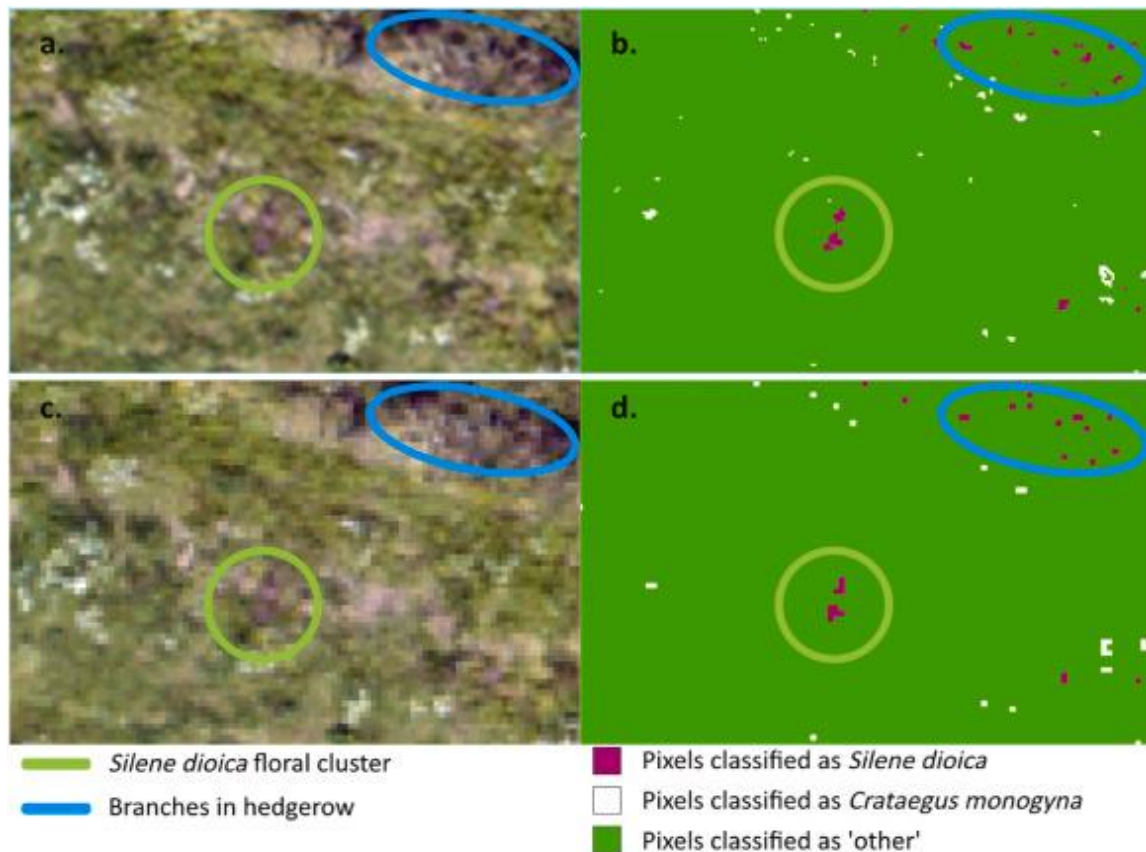


Abb. 10: Klassifikationsergebnis (oben 3cm, unten 7cm Auflösung der Bilddaten), Quelle: Barnsley, Lovett und Dicks (2022)

In jüngster Zeit hat eine Reihe von Studien gezeigt, dass die Deep-Learning-Methode (Teilbereich der künstlichen Intelligenz) der Convolutional Neural Networks (CNN) sehr effektiv ist, um räumliche Muster darzustellen und eine breite Palette von Vegetationseigenschaften aus Fernerkundungsdaten zu extrahieren. CNN können unter anderem für die Erkennung einzelner Pflanzen oder die pixelweise Segmentierung von Vegetationsklassen eingesetzt werden. CNN nutzen dabei räumliche Muster und sind daher besonders erfolgreich, wenn eine sehr hohe räumliche Auflösung gegeben ist. Die Modularität in den gängigen Deep-Learning-Frameworks ermöglicht eine hohe Flexibilität bei der Anpassung von Architekturen, wodurch insbesondere multimodale oder multitemporale Anwendungen profitieren können (Kattenborn u. a. 2021). Auch die Einbeziehung von Citizen Science Daten in Form von Pflanzenfotos als Trainingsdaten ist damit erfolgreich möglich (Soltani u. a. 2022).

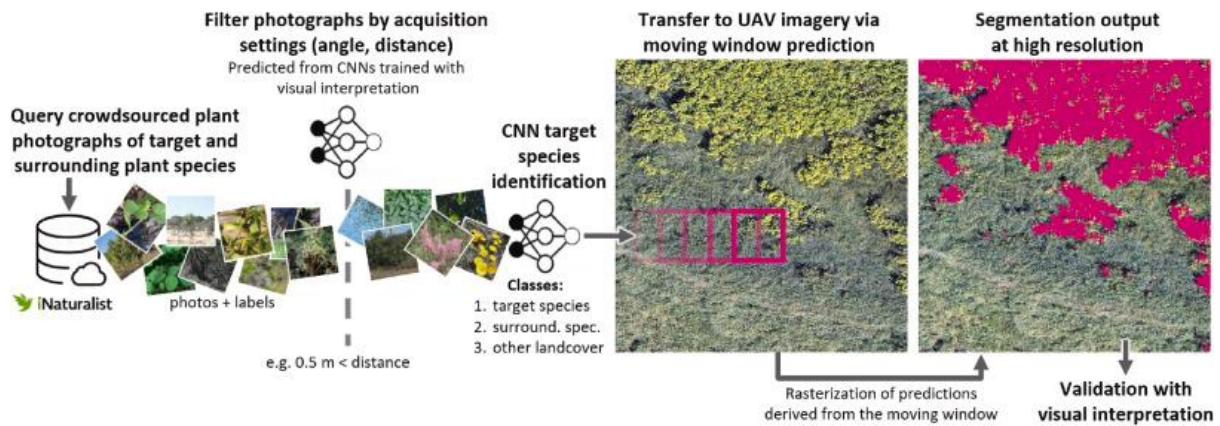


Abb. 11: Prozessablauf der Einbeziehung von Citizen Science Daten in die Klassifikation von Drohnendaten (Quelle: Soltani (2022))

Aber auch weitere Methoden des maschinellen Lernens haben sehr gute Ergebnisse in der Vegetationsklassifikation erzielt. So sind Verfahren des data mining wie z. B. RandomForest (Breiman 2001) oder Algorithmen, die eher Wahrscheinlichkeitsverteilungen abbilden wie Maximum Entropie (Phillips, Anderson und Schapire 2006) in vielen Studien getestet (Feilhauer u. a. 2014; Stenzel u. a. 2014) und mit teils sehr hohen Genauigkeiten für das Monitoring von Habitaten und Dominanzarten eingesetzt worden (Abb. 12).

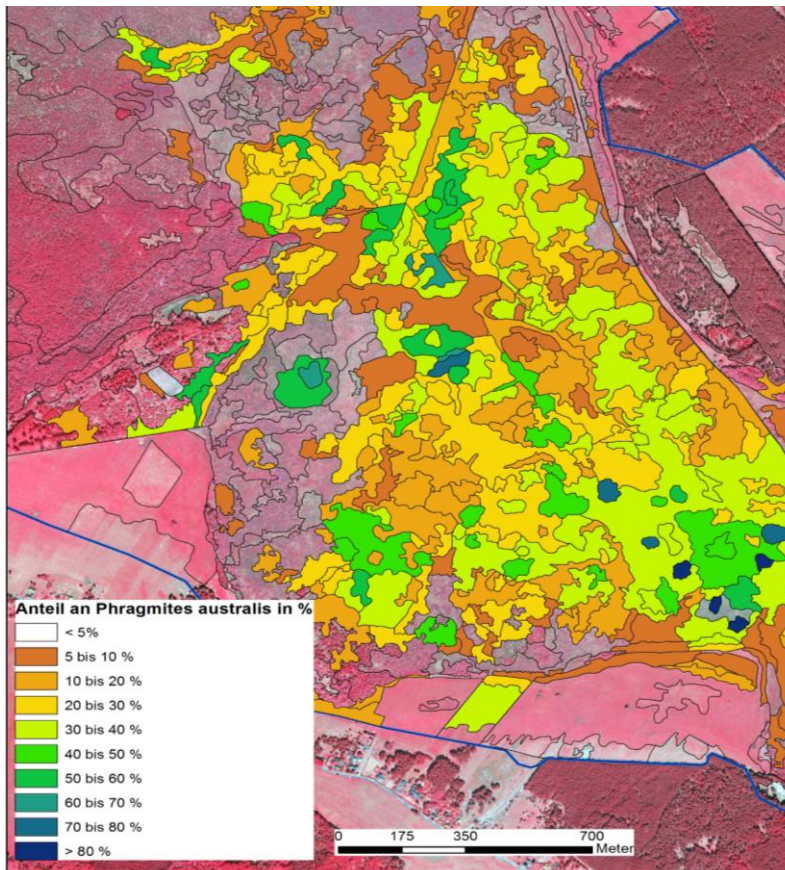


Abb. 12: Beispiel für das Ergebnis einer Maximum Entropie-Auswertung im Ahlbecker Seegrund, basierend auf Sentinel-2 Zeitreihen und RGBI-Orthofotos (Quelle: LUP GmbH)

Seit dem Start der Sentinel Satelliten, deren Daten kostenlos zur Verfügung stehen, und der Öffnung der Landsat Archive hat das satellitenbasierte Monitoring von Biotoptypen an Möglichkeiten gewonnen (Reinermann u. a. 2022; Reinermann, Asam, und Kuenzer 2020; Schwieder u. a. 2022). Speziell was die Analyse von Zeitreihen zur Erkennung von Beeinträchtigungen, wie z. B. Trockenstress betrifft (Kowalski u. a. 2022), sind Fortschritte erzielt worden. Allerdings sind durch die beschränkte räumliche Genauigkeit von maximal 10 m gewisse Grenzen bei der Erkennung von detaillierten Strukturen gegeben, die häufig essentiell für Biotope sind. Im Projekt FELM (Fernerkundungsgestützte Erfassung von LRT für das FFH-Monitoring) wurden beispielsweise Fernerkundungs- und Höhendaten verwendet, um Lebensraumtypen zu bewerten, wobei die Ergebnisse nicht für alle Biotoptypen zufriedenstellend waren (Buck u. a. 2018). Im BfN geförderten Projekt "Analyse der Bedeutung und Auswirkungen Erneuerbarer Energien auf Natura 2000-Gebiete" (2016-2018) wurden die Veränderung der Grünlandanteile in Natura-2000-Gebieten analysiert (Umbruch, Neueinsaat, Umwandlung in Acker) und quantifiziert (Buck u. a. 2020). Derzeit wird im Vorhaben CopGrün (gefördert durch das BMVI) die Überwachung des Zustands und der Verbreitung von geschütztem und schutzwürdigem Grünland mit den Copernicus Satelliten (speziell Sentinel-1 und 2) für verschiedene Arten von geschützten Grünländern untersucht. Die Analyse von Mahdhäufigkeit und Mahdzeitpunkten kann dabei durch Sentinel-1 und 2 Zeitreihen mit guter Genauigkeit erfolgen (Abb. 13) (Reinermann, Asam und Kuenzer 2020).

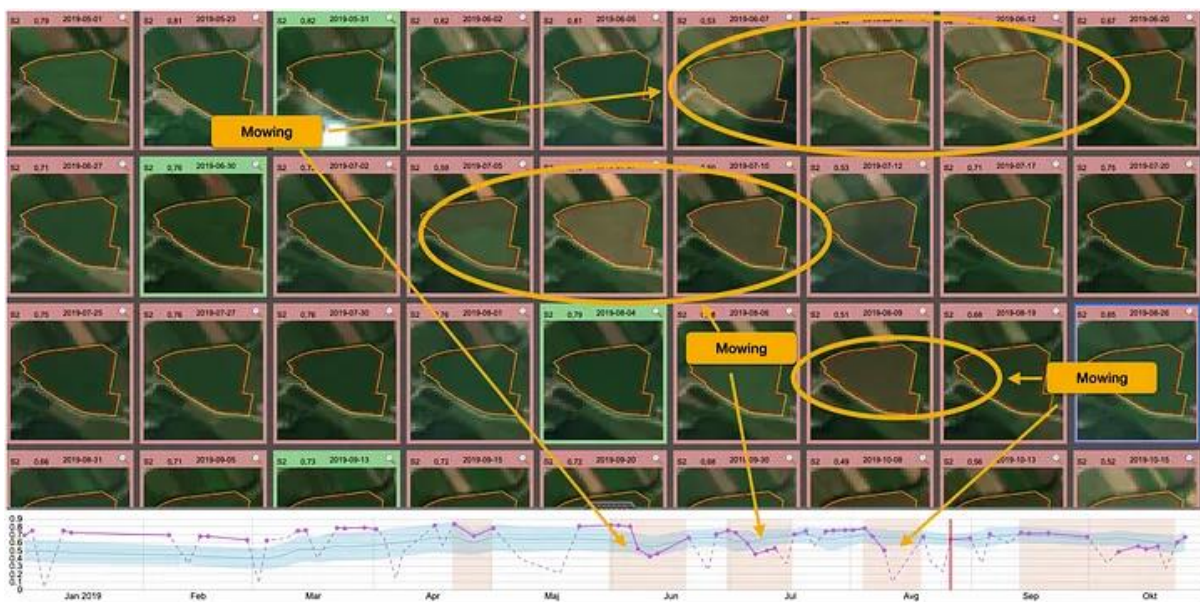


Abb. 13: Analyse der Mahdhäufigkeit und der Mahdzeitpunkte mit Hilfe von Sentinel-2 Zeitreihen (Quelle: Sentinel Hub, Sinergise)

Studien zu spezifischen Vegetationseigenschaften wurden bereits mit multispektralen und Radar-Satellitenbildern sowie mit Aufnahmen von hyperspektralen Feldspektrometern durchgeführt. Die Erkennung von Grünlandschnitten (Lobert u. a. 2021) sowie von Umbrüchen und Alter von Grünland (Lopes u. a. 2017) können wichtige Informationen zur Nutzungsintensität und dem Grünlandzustand beitragen. Auch die Düngungsintensität ist ein wichtiger Parameter für den Erhaltungszustand. Hollberg und Schellberg (2017) untersuchten diese erfolgreich mit Feldspektrometern, Lange u. a. (2022) mit Sentinel-2 (Abb. 14).

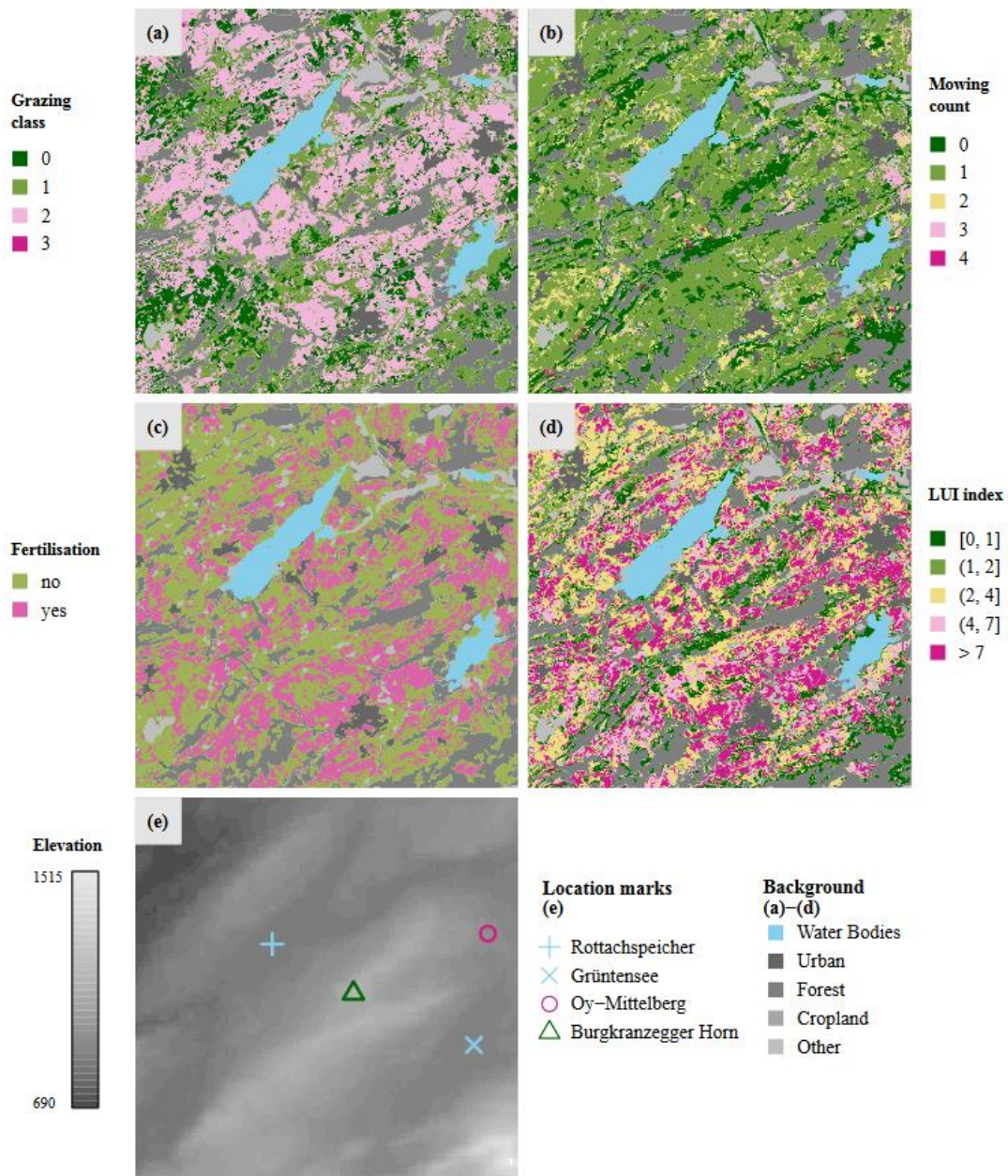


Abb. 14: Beispiel für eine Auswertung von Sentinel-2 Zeitreihen für Aspekte des Grünland-Managements, a) Beweidungsklassen reichen von 0 (keine Beweidung) bis 3 (intensive Beweidung), b) Mahdhäufigkeit von 1 bis 4, c) Düngung (ja/nein), d) Land Use Index von 0 (gering) bis >7 (sehr intensiv), (Quelle: Lange u. a. (2022))

Weitere Qualitätsparameter wie beispielsweise der hydrologische Zustand oder funktionale Merkmale können ebenfalls fernerkundlich festgestellt werden (Asmuß, Bechtold und Tiemeyer 2019; Wang u. a. 2019).

Obwohl es nicht möglich ist, jede einzelne Pflanzenart mittels Fernerkundung zu unterscheiden, können durch eine Analyse der spektralen Unterschiede dominante Arten oder Gesellschaften erkannt werden. So können zum Beispiel Daten mit sehr hoher räumlicher Auflösung in

Kombination mit Ansätzen des maschinellen Lernens verwendet werden, um einzelne ökologische Strategietypen (Lu und He 2017) oder Zielarten wie invasive Unkräuter (Wijesingha u. a. 2020) zu erfassen.

Sehr hilfreich ist oft eine Kombination verschiedener Fernerkundungssensoren; so kann durch ein upscaling von Analysen aus Drohnen- oder Luftbilddaten auf multitemporale Sentinel-2 Daten eine starke Vergrößerung der Trainingsdatenbasis und damit auch eine Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit erzielt werden (Gränzig u. a. 2021; Schiefer u. a. 2020, 2023).

Die Methoden der Klassifikation von Fernerkundungsdaten können grob in drei Teilbereiche zusammengefasst werden. Alle Methodengruppen haben spezifische Vor- und Nachteile, die es abzuwägen gilt. In Tab. 5 sind Vor- und Nachteile der häufig verwendeten Analysemethoden aufgelistet. Methoden der ersten Gruppe (überwachtes Clustering wie Maximum Likelihood) sind im Text nicht weiter aufgeführt, da sie in der Vegetationsfernerkundung weitgehend durch Machine Learning und Deep Learning Verfahren abgelöst wurden.

Tab. 5: Bewertung der Vor- und Nachteile der gängigen Klassifikationsmethoden

Methoden	Vorteile	Nachteile
Klassifikation über überwachtes Clustering (z. B. Maximum Likelihood)	-Erprobte Methodik -Ergebnisse können gut mit anderen Auswertungen verglichen werden -In Standardsoftware integriert, wenig Ressourcen nötig	-Ergebnisse oft nicht auf andere Gebiete und Daten übertragbar -Statistische Vorbedingungen müssen eingehalten werden (Normalverteilung) -Genauigkeit oft geringer als bei Machine Learning oder KI-Methoden
Machine Learning (z. B. Random Forest oder Maximum Entropie)	-Sehr gute und robuste Ergebnisse (höhere Genauigkeit) -Einfach anwendbar, wenig Ressourcen nötig	-Gefahr der Überangepasstheit der Modelle (Overfitting) -Strukturparameter werden oft nicht mit einbezogen
Deep Learning (z. B. Convolutional Neural Networks - CNNs)	-Auch Integration von Kontext und Strukturen -Selbst-lernendes System -Sehr hohe Genauigkeiten möglich -Sehr gut auf andere Gebiete und Daten übertragbar	-Benötigt sehr viele Trainingsdaten zum Lernen des Netzwerkes -Benötigt sehr große Rechen-Ressourcen

Im Rahmen eines Vegetationsmonitorings von Solarparks wurden nach Wissen der Autoren bisher keine Fernerkundungsmethoden dokumentiert und publiziert. Zwar wurden Satelliten oder Drohnen verwendet, um Solarparks zu erkennen und abzugrenzen (international (Plakman, Rosier, und van Vliet 2022) und national (Manske u. a. 2022), zu finden unter: <https://webapp.ufz.de/ee-monitor/re-plant-locations/webgis>), optimale Standorte für Solarparks zu bestimmen (Georgiou und Skarlatos 2016) oder den kühlenden Effekt von PV-Anlagen zu berechnen (Guoqing u. a. 2021), aber ein explizites und publiziertes Monitoring von Grünland und anderen Biotoptypen in Solarparks ist nicht dokumentiert.

Dabei sind Synergien hier möglich, da schon jetzt ein intensives Monitoring der Qualität und des Umfangs von Solarparks, teils von kommerziellen Anbietern, zur Verfügung gestellt wird. So können speziell die konkreten Ausmaße von Solarparks (Manske u. a. 2022), aber auch deren Funktionalität (Zink u. a. o. J.) mit Drohnenaufnahmen ermittelt werden. Dies geschieht recht häufig mittels

thermaler Infrarot-Aufnahmen, welche defekte Paneelen recht sicher erkennen können (Addabbo u. a. 2017).

Fazit

In den letzten Jahren haben sich die Potentiale von Fernerkundungsdaten für die Vegetationskartierung und die Objekterfassung kontinuierlich verbessert, insbesondere aufgrund der Verfügbarkeit kostenloser Satellitendaten wie der Copernicus-Mission (Sentinel-Flotte). Diese Daten bieten eine hohe zeitliche Auflösung, die eine detaillierte Erfassung der saisonalen Entwicklung von Pflanzen ermöglicht, was für die Unterscheidung von Biotoptypen und Nutzungsintensitäten von großer Bedeutung ist. Allerdings haben sich die Herausforderungen in der Vegetationsfernerkundung verschoben: Während es früher hauptsächlich an Daten und ihrer Qualität mangelte, gibt es heute oft einen Mangel an Kapazitäten, um den Informationsgehalt der immensen Datenmengen vollständig auszuschöpfen. Dies führt zu Problemen bei der operationellen Verwendung von Satellitendaten, insbesondere für Behörden. Diese sind oft mit Schwierigkeiten beim Datenmanagement, hohen Anforderungen an die Rechenleistung und steigender Komplexität im Umgang mit den Daten konfrontiert. Daher erfordert der Umgang mit diesen Daten oft hohe Investitionen in die Konzeption und Durchführung der Anwendungen, obwohl die Satellitendaten in der Regel kostenfrei zur Verfügung gestellt werden. Als Folge sind Vegetationskartierungs- und Monitoring-Verfahren, die das volle Potential dieser Satellitendaten ausschöpfen, in der Praxis noch nicht umfassend verfügbar.

Eine Möglichkeit, solche Engpässe zu überkommen, stellen Cloudbasierte Services dar, welche sowohl die Daten als auch die Serverstruktur zur Verfügung stellen und so zumindest die Anforderungen an die Rechenleistung für die Nutzer verringern. Für Behörden in Deutschland gibt es den kostenfreien Service CODE-DE (<https://code-de.org/de/>). CODE-DE bietet einen performanten Zugang zu allen Copernicus Daten über Deutschland, womit über 18 Petabyte verfügbar und für Auswertungen nutzbar gemacht werden.

5 Monitoringkonzept

In den nachfolgenden Kapiteln wird ein mögliches Konzept zum fernerkundlichen Monitoring von PV-Freiflächenanlagen skizziert. Auf Basis der recherchierten Daten und Methoden ergeben sich unterschiedliche Möglichkeiten, die am besten in einem modularen System genutzt werden können. Insgesamt sollte jedoch ein allgemeiner Workflow eingehalten werden, der beispielhaft in Abb. 15 dargestellt wird. Die zugrunde liegenden Fernerkundungsdaten müssen zumeist einer Vorprozessierung unterworfen werden, die abhängig von der verwendeten Datenquelle unterschiedliche Schritte beinhalten kann. Auch die Referenzdaten müssen entsprechend vorbereitet werden. Drohnendaten befinden sich in diesem Workflow in einem Zwischenbereich (roter Kreis in Abb. 15) da sie sowohl zur Referenzdatengewinnung als auch zur Auswertung größerer Flächen eingesetzt werden können. Die Art des Klassifikationsmodells ist austauschbar je nach Ressourcenverfügbarkeit und Datenmenge. In jedem Falle ist eine Validierung der Modellgüte und der Ergebnisse notwendig. Im Prinzip kann dieser Workflow standardisiert und wiederholt durchgeführt werden, um Veränderungen zu dokumentieren.

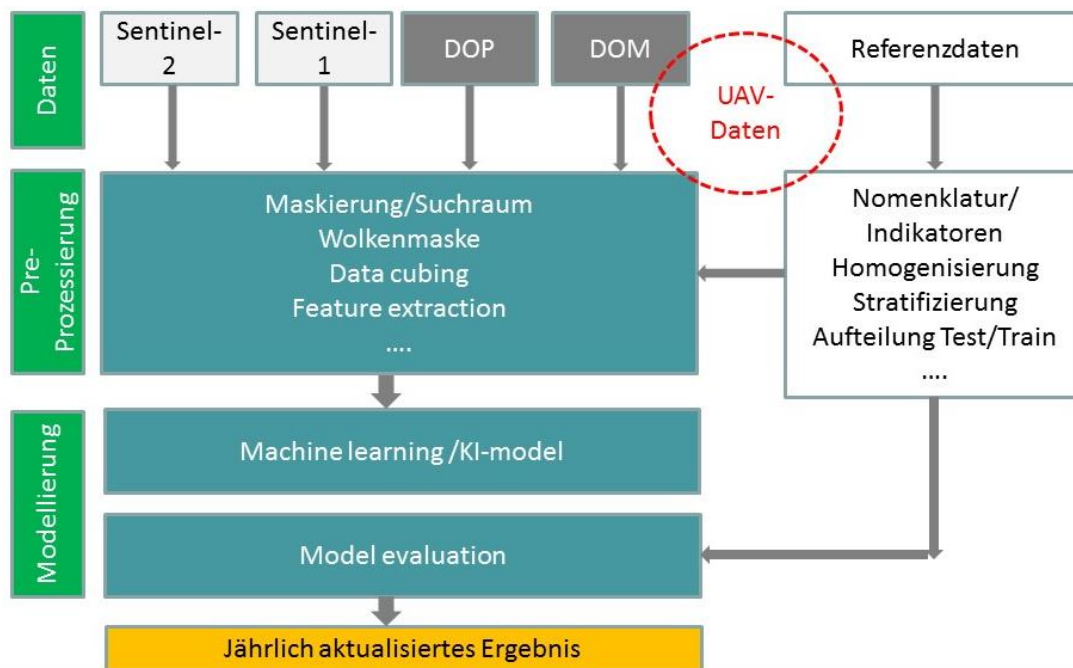


Abb. 15: Beispielhafter technischer Workflow (Quelle: LUP GmbH)

5.1 Ableitung mit Fernerkundung erfassbarer Indikatoren

Die Indikatoren, die fernerkundlich erfassbar sind, bewegen sich auf verschiedenen Betrachtungsebenen:

- Räumlich (Verteilung) und zeitlich (Dynamik),
- Pixel (Raster) oder zonal (Vektor),
- Inhaltlich (techn. Parameter, Biotoptypen, Nutzungsintensität, Strukturen)

Räumliche Indikatoren betrachten eine Verteilung (z. B. Biotoptypen, Strukturelemente) oder Flächenanteile (Anteil überschirmte Bereiche, Anteil versiegelte Fläche, Anteil beschattete Fläche). Zeitliche Parameter beziehen sich einerseits auf die Entwicklung der bestehenden Biotope (z. B. aufwachsende Vegetation, Brachfallen) und andererseits auf die Pflege der Fläche (Mahd- und Beweidungshäufigkeit, Mahdzeitpunkt).

Einige Indikatoren lassen sich besser anhand von Rasterdaten analysieren, da Pixelinformationen eine exaktere Darstellung der Wertespanne ermöglichen (z. B. Versiegelungsgrad, Neigung der Solarmodule). Für andere Parameter bietet sich eine zonale Darstellung an, da eindeutige Zonen abgegrenzt werden können (z. B. Flächengröße der Solarmodule).

In den folgenden Tab. 6, Tab. 7 und Tab. 8 wird zusammenfassend dargestellt, welche Biotoptypen, technischen Merkmale und Nutzungsintensitäten mit verschiedenen Fernerkundungsdaten mit welcher Genauigkeit erfasst werden können. Dabei wird deutlich, dass vor allem eine Kombination verschiedener Sensoren zu größtmöglicher Informationstiefe führt.

Tab. 6: Bewertung der Erfassungsgenauigkeit verschiedener Biotoptypen durch unterschiedliche Fernerkundungsdaten

Biotoptyp	multitemporale Satellitendaten (v.a. Sentinel-2)	Luftbilddaten und räuml. höchst-auflösende Satellitendaten (RGBI)	UAV (Drohrendaten) (RGB o. RGBI)
++ = sehr gut erkennbar, + = gut erkennbar, - = sehr schlecht erkennbar, -/+ = Erkennbarkeit ist abhängig vom Aufnahmezeitpunkt der Daten			
<i>Grünlandtypen</i>			
Intensivgrünland	++	+	+
Feuchtwiesen / Feuchtweiden	+	++	++
Frischwiesen / Frischweiden	+	++	++
Trocken- und Halbtrockenrasen	+	++	++
Grünlandbrachen	+	+	++
Staudenfluren und -säume	-	+	++
<i>Felsen, Block- und Schutthalden, Geröllfelder, offene Bereiche; Sonderbiotope</i>			
Vegetationsfreie und -arme Rohbodenstandorte	+	++	++
Ruderales Pionier-, Gras- und Staudenfluren	-	++	++
Sonstige Spontanvegetation	-	+	++
Block- und Felsschutthalden	+	++	++
Steinhaufen und -wälle	-	++	++
Trockene Gruben	-	+	+
<i>Stehende Gewässer, Röhrichte</i>			
Bäche und kleine Flüsse	-	++	++
Gräben	-	+	++
Röhrichtgesellschaften	+	+	++
Perennierende Kleingewässer	-	+	+
Temporäre Kleingewässer	-	-/+	-/+
Teiche und kleine Staugewässer	+	++	++
<i>Feldgehölze, Gebüsche, Hecken und Gehölzkulturen</i>			
Flächige Laubgebüsche	-	+	+

Feldgehölze	-	+	++
Hecken	-	+	++
Baumreihen	-	++	++
Solitärbäume und Baumgruppen	-	+	++
Zwergstrauchheiden	+	++	++

Tab. 7: Bewertung der Erfassungsgenauigkeit verschiedener Biotopmerkmale und Nutzungsaspekte durch unterschiedliche Fernerkundungsdaten

Biotop-elemente/Merkmale	multitemporale Satellitendaten	Luftbilddaten und räuml. höchstauflösende Satellitendaten	UAV (Drohnen-daten)
<i>++ = sehr gut erkennbar, + = gut erkennbar, - = sehr schlecht erkennbar, -/+ = Erkennbarkeit ist abhängig vom Aufnahmezeitpunkt der Daten</i>			
Gehölzbedeckung	-	++	++
offene Bodenstellen	-	++	++
Blütenreichtum	-	+	++
Dominanzarten	-	+	++
Pflanzengesellschaften	-	+	++
Nutzungsaspekte			
Mahdzeitpunkt	++	-	-
Mahdhäufigkeit	++	-	-
Mulchen	+	-	-
Beweidung	-	++	++

Tab. 8: Bewertung der Erfassungsgenauigkeit verschiedener technischer Solarpark-Parameter durch unterschiedliche Fernerkundungsdaten

Parameter	multitemporale Satellitendaten	Luftbilddaten und räumlich höchstauflösende Satellitendaten	UAV (Drohnen-daten)
<i>++ = sehr gut erkennbar, + = gut erkennbar, - = sehr schlecht erkennbar, -/+ = Erkennbarkeit ist abhängig vom Aufnahmezeitpunkt der Daten</i>			
Anlagengröße	+	++	++
Reihenabstand	-	++	++
Überschirmter Anteil an Gesamtfläche	+	++	++
Höhe der Modultische	-	++	++
Ausrichtung der Module	-	++	++
Neigung der Module	-	++	++
Versiegelungsgrad der Gesamtfläche	+	++	++
Umzäunung	-	+	++

5.2 Ableitung nutzbarer Datenarten

Je nach Betrachtungsebene sind verschiedene Fernerkundungsdaten nutzbar. Die wichtigsten Fernerkundungsdaten für ein großflächiges wiederholtes Monitoring sind dabei multitemporale Satellitendaten der Sentinel-Flotte in Kombination mit RGBI-Luftbildern der jeweiligen Landesbefliegungen. Ergänzend bzw. für eine vertiefte Analyse könnten Drohnen-Aufnahmen mit RGB- oder besser noch RGBI-Kameras genutzt werden. Eine vertiefte Analyse würde aber mit erhöhten Kosten einhergehen, da dann sowohl die Datenerhebung als auch die Auswertung sehr viel arbeitsintensiver sind (siehe Kapitel 3.3).

Eine große Bedeutung kommt der Referenzdatenbank zu. Nur mit qualitativ und quantitativ ausreichenden Trainingsdaten können gute Klassifikationsmodelle aufgebaut werden. Dazu bedarf es einer homogenisierten und harmonisierten Datenbank. Wichtige Kriterien für die Anwendung einer harmonisierten Datenbankstrategie in einem integrierten Monitoring-Konzept sind:

- Gewährleistung der Datenhaltung und -sicherung im Hinblick auf langfristige Zugangsmöglichkeiten
- Konsistente Überprüfung der Daten und Metadaten sowie der Verwertbarkeit und des langfristigen Zugangs zu den Datensätzen
- Prüfung der Möglichkeit einer offenen Datenverfügbarkeit im Sinne einer transparenten Darstellung und Nutzbarkeit

5.3 Erstellung eines Monitoringkonzeptes

Aus den vorangegangenen Kapiteln ergeben sich einige zentrale Anforderungen, die ein Monitoringkonzept erfüllen muss. In Tab. 9 sind diese zusammengefasst und mit möglichen Lösungsmöglichkeiten gegenübergestellt.

Tab. 9: Gegenüberstellung der Herausforderungen und Lösungsvorschläge für ein fernerkundungsbasiertes Monitoring von Freiflächensolaranlagen

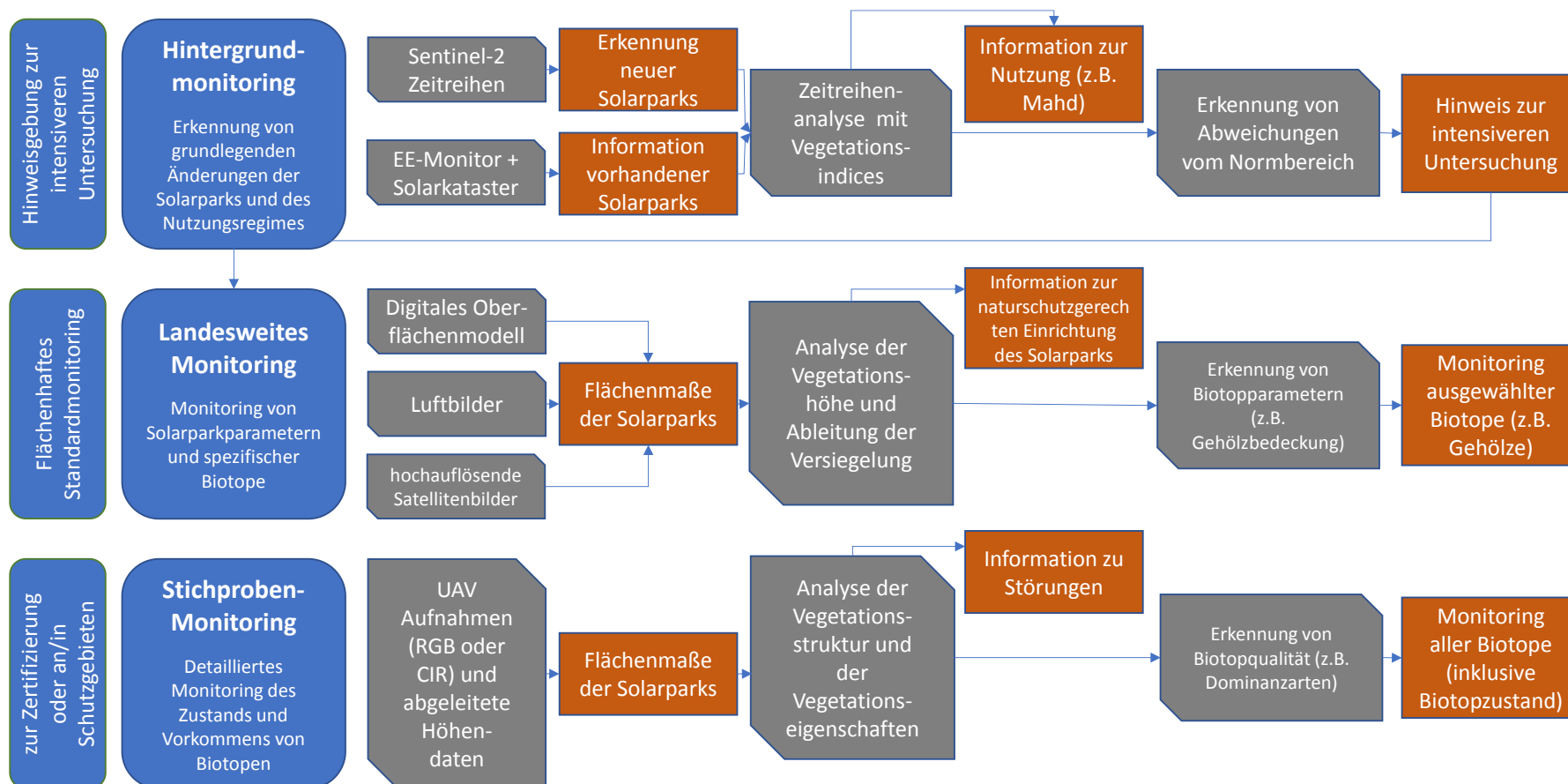
Herausforderungen	Lösungsvorschläge
Viele Trainingsdaten notwendig	-Bestehende Programme nutzen
Heterogene Daten als Referenz-/Trainingsgrundlage	-Homogenisierung, Standard-Nomenklaturen nutzen, -Gewährleistung der Datenhaltung und -sicherung im Hinblick auf langfristige Zugangsmöglichkeiten, -Konsistente Überprüfung der Daten und Metadaten
Große Menge an Fernerkundungsdaten muss verarbeitet werden	-Cloud-Prozessierung, Nutzung vorhandener Data-Cubes und Infrastruktur (z. B. FORCE auf CODE-DE)
Hohe Genauigkeit in der Erfassung notwendig, da jährliche Aktualisierung	-Multi-sensorales Modell verwenden (Kombination aus Sentinel-1 und 2 und digitalen Orthofotos) -Machine learning/Deep learning-Modelle verwenden
Verschiedene Anwendungsebenen notwendig (mind. Bundes- und Landesebene)	-Modulares Konzept verwenden, evtl. an andere Programme andocken (z. B. CopGrün oder MonVIA)

Wie schon in den vorangegangenen Kapiteln und Tab. 6 und Tab. 7 gezeigt, sind verschiedene Datentypen für die Ableitung von Informationen über die Biotope und deren Nutzung verwendbar. Daher wird hier ein mehrstufiges Verfahren zum fernerkundungsbasierten Monitoring von Solarparks vorgeschlagen, welches sich auch in den einzelnen Planungsebenen widerspiegelt.

Generell kann der Prozess dabei in drei Monitoringebenen gegliedert werden (siehe Abb. 16), die aber auch aufeinander aufbauen und synergetisch genutzt werden können:

- häufig wiederholtes (multitemporales) **Hintergrundmonitoring** mit kostenfreien Satellitendaten als Hinweisgeber zur generellen Nutzung des Solarparks und für eine intensivere Untersuchung in den detaillierten Monitoringebenen,
- **Landesweites Monitoring** einzelner Bundesländer mit amtlich verfügbaren Daten zur Erkennung der technischen Parameter der Solarparks und zum Monitoring ausgewählter Biotoptypen, die auf Basis von Luftbilddaten erkannt werden können,
- ein spezifisches **Stichprobenmonitoring** einzelner Solarparks auf Anfrage mittels UAVs (Drohnen) zur detaillierten Erkennung von Biotopen und deren Zustand.

Abb. 16: Schema eines fernerkundungsbasierten Monitoringkonzepts von Solarparks



Die einzelnen Ebenen des Monitoringkonzeptes werden in den folgenden Kapiteln detaillierter dargestellt. Dabei wird exemplarisch am Solarpark Bochow in Brandenburg gezeigt, wie einzelne Aspekte umgesetzt werden könnten. Der Solarpark Bochow befindet sich in der Gemeinde Groß Kreuz in der Nähe der Stadt Brandenburg an der Havel und wurde in den Jahren 2011 und 2012 errichtet.

5.3.1 Hintergrundmonitoring

Das erste Ziel des Hintergrundmonitorings ist die Lokalisierung und Erfassung der existierenden Freiflächensolaranlagen. Dazu werden zunächst Informationen aus Solarkatastern herangezogen, um bereits erfasste Solarparks zu identifizieren. Bestehende Daten aus dem EE-Monitor stellen ebenfalls eine wichtige Ausgangsbasis dar (Thrän u.a. 2020). Zusätzlich werden Zeitreiheninformationen von Sentinel-2-Daten verwendet, um neue Solarparks oder Erweiterungen von bestehenden Freiflächenanlagen zu erkennen. Die spektrale Signatur der Solarmodule macht es dabei möglich, mit hoher Wahrscheinlichkeit neue Gebiete zu erkennen. Dies kann anhand verschiedener Modelle erfolgen (z.B. Bildsegmentierung oder Random Forest Klassifikation (Plakman, Rosier, und van Vliet 2022)). Zum Training des spezifisch verwendeten Modells sind Eingangsdaten nötig, die Beispiele für Modulflächen abgrenzen. Zur Erfassung der Trainingsdaten können die durch das Solarkataster bekannten Standorte verwendet bzw. die Trainingsdaten manuell in einem Luftbild abgegrenzt werden, sofern keine Geodatensätze vorliegen.

Weiterhin werden aus den Zeitreihen der Sentinel-Daten Vegetationsindizes (z. B. der Normalized Difference Vegetation Index) berechnet, durch die auch in der verhältnismäßig groben räumlichen Auflösung von 10 m eine Vegetationsbedeckung erkannt werden kann. Durch die hohe zeitliche Auflösung der Satellitendaten können weiterhin Pflege- und Nutzungsaspekte wie der Mahdzeitpunkt, die Mahdhäufigkeit oder das Brachfallen von Flächen abgeleitet werden.

Darüber hinaus können die Zeitreihen genutzt werden, um starke Unterschiede des normalen phänologischen Verlaufs im Gebiet zu erkennen. Diese Information kann als Risikozeiger genutzt werden, um das Monitoring detaillierter in einem der beiden weiteren Stufen des Monitoringkonzeptes fortzusetzen.

Ein weiterer wichtiger Aspekt des Hintergrundmonitorings ist die Erfassung der Landbedeckung/Landnutzung vor Errichtung der Anlage. Dabei werden bereits wertvolle Hinweise gesammelt, ob die Flächen potenziell an Biodiversität gewonnen oder verloren haben (z.B. potenzielle Aufwertung bei vorheriger intensiver Ackernutzung oder potenzielle Verluste bei vorheriger extensiver Grünlandnutzung).

Im Beispiel des Solarparks Bochow kann zunächst über den EE-Monitor des UFZ Leipzig (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung 2023), die genaue Größe und Leistung erfasst und die Fläche bestimmt werden (siehe Abb. 17).



Abb. 17: Darstellung des Solarparks Bochow im EE-Monitor (Quelle: Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung 2023)

Nachfolgend kann entweder über historische Fernerkundungsdaten wie Luftbilder (siehe Abb. 18) oder Satellitenbilder (z. B. Landsat) die Landnutzung vor dem Bau der Anlage abgeleitet werden.

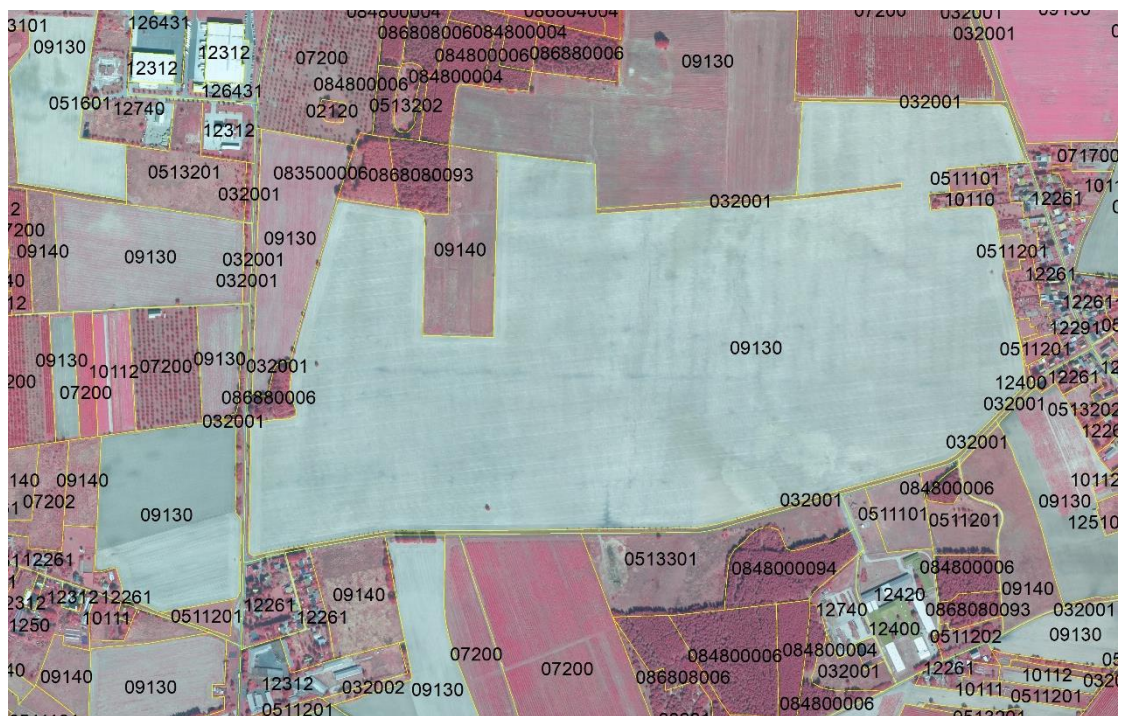


Abb. 18: Darstellung der Fläche des Solarparks Bochow vor Bau der Anlage, CIR-Orthofoto und Bio-ecotypenkartierung von 2009, in gelb Flächengrenzen der Bio-ecotypenkartierung, Beschriftung: Bio-ecotypencode, 9130 bedeutet Intensivacker, 9140 bedeutet Ackerbrache (Quelle: LUP GmbH)

Durch Verschneidung der historischen Landnutzung/Landbedeckung mit den Abgrenzungen des Solarparks können Hinweise auf die Art der Entwicklung abgeleitet werden. Am Beispiel des Solarparks Bochow ergibt die Analyse, dass 4 ha der Fläche vormals als Ackerbrache genutzt wurden, während 74.5 ha vormals Intensivacker waren.

In einem weiteren Schritt wurden im Solarpark Bochow mithilfe einer Cloudcomputing Plattform für ausgewählte Bereiche die zeitliche Vegetationsentwicklung für das Jahr 2021 mit Hilfe eines Vegetationsindex (Normalised Difference Vegetation Index – NDVI) berechnet (siehe Abb. 18). Daraus lässt sich ablesen, dass die Fläche als extensives Grünland mit einschüriger Mahd genutzt wird.

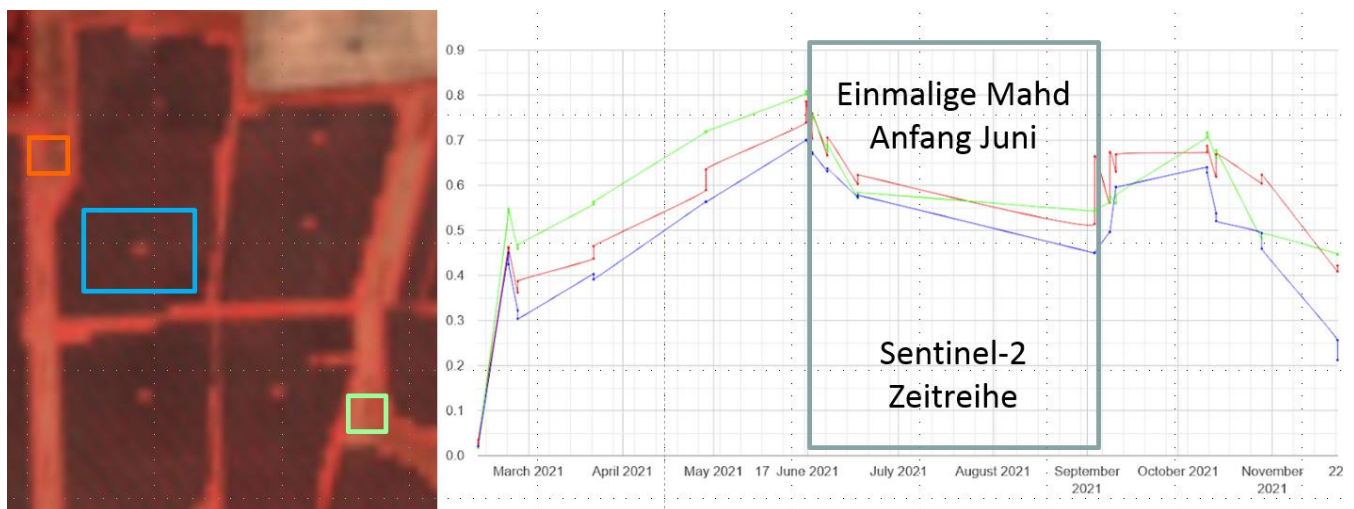


Abb. 19: Darstellung der Vegetationsentwicklung in Beispielbereichen des Solarparks Bochow Bild links: Beispielbereiche: 2x Freiflächen zwischen den Modulen (rot, grün), 1x Fläche mit Solarmodulen (blau), Graphik rechts: Verlauf des Vegetationsindex NDVI für 2021 (Quelle: LUP GmbH)

Die Durchführung des Hintergrundmonitorings sollte auf der Bundesebene angesiedelt sein, um eine bundesweite standardisierte Bestandsaufnahme der Solarparks und deren naturräumlicher Ausstattung in einer Hand zu ermöglichen. Mögliche Akteure, bei denen solch ein Monitoring angesiedelt sein könnte, wären das Bundesamt für Naturschutz (BfN) oder das Umweltbundesamt (UBA). Anhand des Hintergrundmonitorings können bereits erfasste und neue Solarparks identifiziert sowie Informationen zur Nutzung und Bodenbedeckung vor und nach Installation der Anlage anhand kostenfreier Satellitendaten generiert werden. Auch die Ableitung technischer Parameter ist in Grenzen möglich, kann jedoch im Rahmen des landesweiten Monitorings anhand von höheraufgelösten Luftbildern noch detaillierter erfolgen.

Auf dieser Monitoringstufe ist durch den Vergleich der Landnutzung/Bodenbedeckung vor und nach Installation der Anlage ein erster Hinweis auf potenzielle „Biodiversitäts-Solarparks“ möglich.

5.3.2 Landesweites Monitoring

Im Rahmen des landesweiten Monitorings könnten besonders auf Bundeslandebene flächendeckend vorhandene Geodaten, wie Luftbilder und digitale Oberflächenmodelle, verwendet werden. Damit sind auf den im Hintergrundmonitoring definierten Flächen der Solarparks zunächst deren Flächenmaße bestimmbar. Darunter fallen speziell die Reihenabstände der Anlagen, die Höhe der Tische oder die Modulfläche in Relation zur Gesamtfläche des Solarparks. Zusammen mit weiteren abgeleiteten Parametern, wie der Vegetationshöhe oder versiegelten Fläche, könnten so

bereits Kriterien für eine naturschutzgerechte Nutzung der Solarparks erarbeitet werden, wobei hier auch die Nutzungsintensität aus dem Hintergrundmonitoring mit einfließen kann.

Weiterhin können auf dieser Ebene schon viele Informationen zu Biotopparametern erkannt werden, welche zur Detektion von ausgewählten Biotoptypen nutzbar ist. Hierbei handelt es sich speziell um Feucht- und Frischweiden, Trockenrasen, Rohbodenstandorte, Pioniergewächse, Baumreihen, Seggenbereiche und Zwergstrauchheiden. Allerdings ist die Qualität der Ableitung dieser Biotoptypen stark abhängig von den Eingangsdaten. Beispielsweise hat der Zeitpunkt der Erhebung der Luftbilder einen erheblichen Einfluss auf die Genauigkeit der Erkennung von Dominanzarten oder Blütenreichtum diverser Grünland- und Heidebiotoptypen.

Im Bereich des Solarparks Bochow kann auf kostenfrei bereitgestellte CIR-Luftbilder der Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB) zurückgegriffen werden. Hier können über eine Segmentierung die einzelnen Module als GIS-Vektordateien (z. B. Shapefiles) gespeichert und darüber genaue Informationen, beispielsweise über das Verhältnis der überbauten Fläche zur Vegetationsfläche und zum Reihenabstand gewonnen werden (siehe Abb. 20).

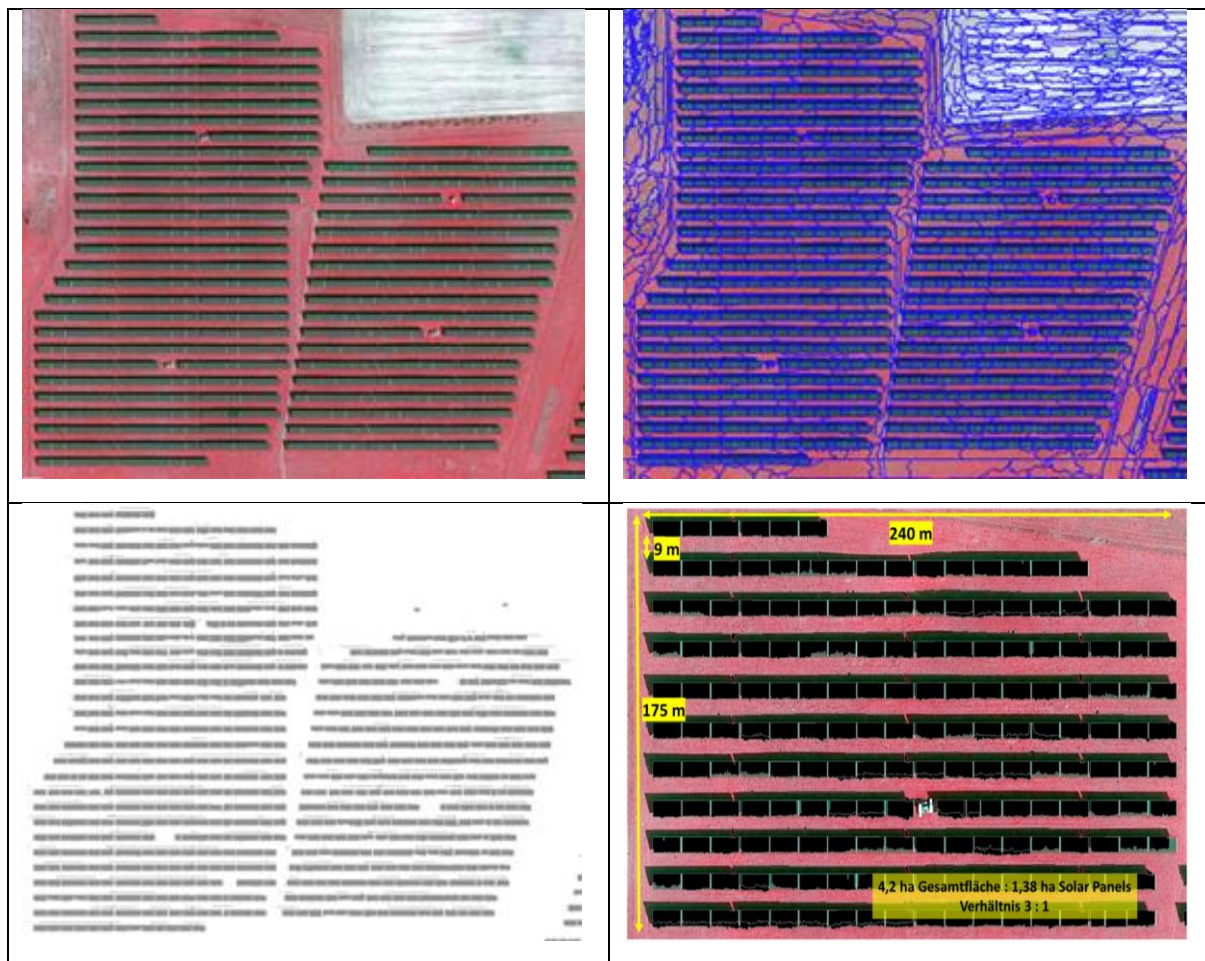


Abb. 20: links oben: CIR-Luftbild eines Ausschnittes des Solarparks Bochow, rechts oben: Segmentierung des Ausschnittes, links unten: Extraktion der Solarmodule, rechts unten: Ableitung von technischen Parametern, z. B. Reihenabstand oder Verhältnis von Modulen zur Vegetationsfläche.

Weiterhin können bildbasierte Digitale Oberflächenmodelle (bDOMs) von der Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg (LGB) bezogen werden (siehe Abb. 21). Damit sind Informationen über die Höhe und Ausrichtung der Solarmodule sowie Strukturparameter der Vegetation (z. B. Höhe von Gehölzen) ableitbar.



Abb. 21: bDOM des Solarparks Bochow

Im Rahmen des landesweiten Monitorings können auf Grundlage von räumlich höher aufgelösten Luftbildern und Oberflächenmodellen die Solarparks sehr genau in ihrer technischen Ausstattung sowie den vorhandenen Biotoptypen beschrieben werden. Die Durchführung dieser Monitoringstufe könnte auf Landesebene beispielsweise durch die Landesumweltämter erfolgen, ist jedoch auch auf Bundesebene (z. B. durch BfN oder UBA) möglich, falls dort Zugriff auf die nötigen Geodaten der Bundesländer besteht. Durch die Ableitung verschiedener Indikatoren sowohl zur technischen Ausstattung als auch der Landnutzungsintensität ist auf dieser Monitoringstufe eine Einordnung von potenziellen „Biodiversitäts-Solarparks“ anhand eines Kriterienkatalogs möglich.

5.3.3 Stichprobenmonitoring

Im Rahmen von speziellen Kontrollen oder zur Zertifizierung von Solarparks als spezifisch naturschutzrelevant, bzw. bei der Untersuchung von Solarparks in Schutzgebieten (z. B. Landschaftsschutzgebieten), ist in diesem Monitoringkonzept ein Stichprobenmonitoring vorgesehen.

Dafür werden Unmanned Airborne Vehicles (UAVs) eingesetzt. Je nach Anwendung können hier Aufnahmen im sichtbaren Bereich (RGB) oder zusätzlich in dem für die Vegetationsbeobachtung besonders wichtigen Bereich des nahen Infrarots (RGBI) durchgeführt werden. Vorteile von UAV-Befliegungen liegen in der sehr hohen räumlichen Auflösung der generierten Geodaten und der selbstbestimmten Wahl des Aufnahmezeitpunktes.

Über diese Aufnahmen können, neben der erneuten und genaueren Bestimmung der Flächenmaße, nun auch Vegetationsstrukturen und Vegetationseigenschaften bestimmt werden. Dies führt zu einer größeren Anzahl von zu bestimmenden Biotopen (siehe Tab. 6) und deren Zustand. Zusätzlich können auch kleinteiligere Störungen der Biotope erfasst und ggf. Maßnahmen ergriffen werden.

Die Durchführung eines Stichprobenmonitorings bietet sich aufgrund der Detailtiefe insbesondere für die Solarparkbetreiber oder für Zertifizierungsorganisationen an. Anhand von räumlich sehr hochaufgelösten Daten (z.B. Drohnendaten) können die spezifischen Bedingungen eines Solarparks hinsichtlich des Arteninventars, des Zustands der Biotope sowie möglicher Störungen im Rahmen eines solchen Monitorings erfasst werden. Nicht zuletzt kann durch die detaillierte Kartierung eines Solarparks auf Grundlage sehr hochaufgelöster Daten die Referenzdatenbasis (vgl. Kapitel 3.1) für Fernerkundungsmodelle erweitert werden.

Auf dieser Ebene des Monitorings wäre auch eine Verbindung mit Citizen Science-Projekten möglich (z. B. Floralncognita), um auf größere Kapazitäten zur Datenerfassung zurückzugreifen.

6 Fazit

Aus den Recherchen ergibt sich, dass die Daten- und Methodenlage ein Monitoring im Sinne der Fragestellung ermöglicht. Auf Grundlage der in den letzten 10 Jahren sprunghaft angestiegenen Datenmenge sowie stark verbesserter Methoden aufgrund der ebenfalls sprunghaft gestiegenen Prozessorleistung und Grafikkartenkapazität ist ein operationell und großflächig einsetzbares Monitoring-Verfahren mit Hilfe von Cloud-Technologien realisierbar.

Die höchste Erfassungsgenauigkeit wird sich potenziell bei einem Einsatz **von multi-sensoralen und multi-temporalen Verfahren** ergeben, die mindestens auf machine learning besser noch auf deep learning Verfahren beruhen und einen Fokus vor allem auf optischen Sensoren haben.

Der Aufbau eines **modularen Monitoring-Systems** ist empfehlenswert, da so ein leichtes Anbinden an andere bestehende Programme auf Landes- und Bundesebene mit ähnlichen Fragestellungen möglich ist.

Das erarbeitete Konzept sollte anhand von **Fallstudienanalysen** erprobt und verfeinert und mit einer detaillierten **Anforderungsanalyse** der potenziellen Nutzergruppen verbunden werden.

7 Literatur

- Addabbo, Pia u.a. 2017. „A UAV infrared measurement approach for defect detection in photovoltaic plants“. In IEEE, 345–50.
- Anders, Kenneth, Jadranka Mrzljak, Dieter Wallschläger, und Gerhard Wiegleb. 2004. *Handbuch Offenlandmanagement*. Berlin, Heidelberg: Springer. <http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-18645-5> (1. Februar 2023).
- Armstrong, Alona, Nicholas J Ostle, und Jeanette Whitaker. 2016. „Solar Park Microclimate and Vegetation Management Effects on Grassland Carbon Cycling“. *Environmental Research Letters* 11(7): 074016.
- Asmuß, Tina, Michel Bechtold, und Bärbel Tiemeyer. 2019. „On the Potential of Sentinel-1 for High Resolution Monitoring of Water Table Dynamics in Grasslands on Organic Soils“. *Remote Sensing* 11(14): 1659.
- Badelt, Ole u. a. 2020. *Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE)*. https://www.umwelt.niedersachsen.de/download/161527/Bericht_Integration_von_Solarenergie_in_die_niedersaechsische_Energielandschaft_INSIDE_.pdf.
- Barnsley, S.L., A.A. Lovett, und L.V. Dicks. 2022. „Mapping Nectar-Rich Pollinator Floral Resources Using Airborne Multispectral Imagery“. *Journal of Environmental Management* 313: 114942.
- Benzler, Armin. 2018. *Das Monitoring der Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert in Deutschland*. DE: Bundesamt für Naturschutz. <https://doi.org/10.19217/skr476> (2. Mai 2023).
- Breiman, Leo. 2001. „[No title found]“. *Machine Learning* 45(1): 5–32.
- Buck, Oliver u.a. 2018. „Der Einsatz von Fernerkundung im FFH-Monitoring am Beispiel der Anwendung FELM“. *Natur und Landschaft* 93(5): 215–23.
- Buck, Oliver u. a. 2020. *Landnutzungsänderungen in Natura 2000-Gebieten*. 566. Aufl. DE: Bundesamt für Naturschutz. <https://doi.org/10.19217/skr566> (7. März 2023).
- Bundesamt für Naturschutz. 2021. *Ökosystem-Monitoring auf bundesweit repräsentativen Stichprobenflächen (ÖSM-I)*. 586. Aufl. DE: Bundesamt für Naturschutz. <https://doi.org/10.19217/skr586> (2. Mai 2023).
- Bundesamt für Naturschutz. 2023. „Natura 2000 - Lebensraumtypen“. *Lebensraumtypen*. <https://www.bfn.de/lebensraumtypen>.
- Bundesverband Neue Energiewirtschaft. 2022. *Gute Planung von PV-Freilandanlagen. Wie sich Belange der Energiewende, des Umwelt- und Naturschutzes und der Landwirtschaft vereinen lassen*. Berlin. <https://gute-solarparks.de/wp-content/uploads/2022/10/bne-Gute-Planung-PV-Freilandanlagen.pdf>.
- Bundesverband Solarwirtschaft e.V. und NABU. 2021. *Kriterien für naturverträgliche Photovoltaik-Freiflächenanlagen*. https://www.solarwirtschaft.de/datawall/uploads/2021/04/210428_NABU-BSW-Papier-1.pdf (16. März 2023).

- Capolupo, Alessandra u. a. 2015. „Estimating Plant Traits of Grasslands from UAV-Acquired Hyperspectral Images: A Comparison of Statistical Approaches“. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 4(4): 2792–2820.
- Cavender-Bares, Jeannine, John A. Gamon, und Philip A. Townsend, hrsg. 2020. *Remote Sensing of Plant Biodiversity*. Springer Nature. <https://library.oapen.org/handle/20.500.12657/39986> (13. Januar 2023).
- Corbane, Christina u. a. 2015. „Remote Sensing for Mapping Natural Habitats and Their Conservation Status – New Opportunities and Challenges“. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 37: 7–16.
- Demuth, Bernd, Alexander Maack, Jochen Schumacher, und Darja Süßbier. 2019. *Klima- und Naturschutz: Hand in Hand; ein Handbuch für Kommunen, Regionen, Klimaschutzbeauftragte, Energie-, Stadt- und Landschaftsplanungsbüros. Heft 6: Photovoltaik-Freiflächenanlage: Planung und Installation mit Mehrwert für den Naturschutz / Bernd Demuth, Alexander Maack, mit einem Beitrag von Jochen Schumacher, Illustrationen: Darja Süßbier*. Berlin 2019 (Bearbeitungsstand: Juni 2018). Leipzig: Bundesamt für Naturschutz.
- Dullau, Sandra. 2022. „Gestaltungsmaßnahmen für eine naturverträgliche Freiflächen-Solaranlage zur Steigerung der Biodiversität“. https://offenlandinfo.de/fileadmin/user_upload/BIODIV-SOLAR/Dullau_Gestaltungsmassnahmen_Solarparks_klein.pdf.
- Feilhauer, Hannes u. a. 2014. „Mapping the Local Variability of Natura 2000 Habitats with Remote Sensing“ hrsg. Duccio Rocchini. *Applied Vegetation Science* 17(4): 765–79.
- Fluhr-Meyer, Gerti, und Steffen Döring. 2023. „Einsatz von Drohnen im Naturschutz – Ergebnisse einer Tagung“. https://www.anl.bayern.de/publikationen/anliegen/doc/an45201_fluhr_meyer_et_al_2023_drohnen.pdf.
- Förster, M, A Frick, H Walentowski, und B Kleinschmit. 2008. „Approaches to utilising QuickBird data for the monitoring of NATURA 2000 habitats“. *Community Ecology* 9(2): 155–68.
- Frick, Annett u. a. 2011. „Monitoring of the vegetation composition in rewetted peatland with iterative decision tree classification of satellite imagery“. *Photogrammetrie-Fernerkundung-Geoinformation*: 109–22.
- Geidezis, Liana, Daniela Leitzbach, und Helmut Schlumprecht. 2015. *Aktualisierung der Bestandsaufnahme Grünes Band mit Schwerpunkt auf den Veränderungen in den Offenlandbereichen: Endbericht des gleichnamigen F+E-Vorhabens (FKZ 3512 85 0600)*. hrsg. Bund Naturschutz in Bayern. Bonn-Bad Godesberg: BfN.
- GEO BON. 2023. „GEO BON“. *GEO BON*. <https://geobon.org> (9. Mai 2023).
- Georgiou, Andreas, und Dimitrios Skarlatos. 2016. „Optimal site selection for sitting a solar park using multi-criteria decision analysis and geographical information systems“. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems* 5(2): 321–32.
- Gränzig, Tobias, Fabian Ewald Fassnacht, Birgit Kleinschmit, und Michael Förster. 2021. „Mapping the Fractional Coverage of the Invasive Shrub *Ulex Europaeus* with Multi-Temporal Sentinel-2 Imagery Utilizing UAV Orthoimages and a New Spatial Optimization Approach“. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 96: 102281.

- Guoqing, Li u. a. 2021. „Ground-mounted photovoltaic solar parks promote land surface cool islands in arid ecosystems“. *Renewable and Sustainable Energy Transition* 1: 100008.
- Hansen, M. C. u. a. 2013. „High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change“. *Science* 342(6160): 850–53.
- Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung. 2023. „EE-Monitor - Monitoring Für Eine Naturverträgliche Energiewende“. *EE-Monitor*. <https://ee-monitor.de> (10. Mai 2023).
- Hietel, Prof. Dr. Elke, Tanja Reichling, und Claudio Lenz. 2021. *Leitfaden für naturverträgliche und biodiversitätsfreundliche Solarparks – Maßnahmensteckbriefe und Checklisten*. https://mkuem.rlp.de/fileadmin/mulewf/Themen/Energie_und_Strahlenschutz/Energie/Leitfaden_Massnahmensteckbriefe.pdf.
- Hollberg, Jens, und Jürgen Schellberg. 2017. „Distinguishing Intensity Levels of Grassland Fertilization Using Vegetation Indices“. *Remote Sensing* 9(1): 81.
- Jetz, Walter u. a. 2019. „Essential Biodiversity Variables for Mapping and Monitoring Species Populations“. *Nature Ecology & Evolution* 3(4): 539–51.
- Kattenborn, Teja, Jens Leitloff, Felix Schiefer, und Stefan Hinz. 2021. „Review on Convolutional Neural Networks (CNN) in vegetation remote sensing“. *ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing* 173: 24–49.
- Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende. 2021. *Kriterien für eine naturverträgliche Gestaltung von Solar-Freiflächenanlagen*. https://www.naturschutz-energiewende.de/wp-content/uploads/KNE_Kriterienkatalog-zur-naturvertraeglichen-Anlagengestaltung-PV-Freiflaechenanlagen.pdf (9. Februar 2023).
- Kowalski, Katja, Akpona Okujeni, Maximilian Brell, und Patrick Hostert. 2022. „Quantifying Drought Effects in Central European Grasslands through Regression-Based Unmixing of Intra-Annual Sentinel-2 Time Series“. *Remote Sensing of Environment* 268: 112781.
- Landesumweltamt Brandenburg. 2007. *Biotopkartierung Brandenburg - Band 2, Beschreibung der Biotoptypen*.
- Lange, Maximilian, Hannes Feilhauer, Ingolf Kühn, und Daniel Doktor. 2022. „Mapping Land-Use Intensity of Grasslands in Germany with Machine Learning and Sentinel-2 Time Series“. *Remote Sensing of Environment* 277: 112888.
- Lobert, Felix u. a. 2021. „Mowing Event Detection in Permanent Grasslands: Systematic Evaluation of Input Features from Sentinel-1, Sentinel-2, and Landsat 8 Time Series“. *Remote Sensing of Environment* 267: 112751.
- Lopes, Mailys, Mathieu Fauvel, Stéphane Girard, und David Sheeren. 2017. „Object-Based Classification of Grasslands from High Resolution Satellite Image Time Series Using Gaussian Mean Map Kernels“. *Remote Sensing* 9(7): 688.
- Lu, Bing, und Yuhong He. 2017. „Species Classification Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV)-Acquired High Spatial Resolution Imagery in a Heterogeneous Grassland“. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 128: 73–85.
- Manske, David u. a. 2022. „Geo-Locations and System Data of Renewable Energy Installations in Germany“. *Data* 7(9): 128.

- Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg. 2019. *Freiflächsolaranlagen - Handlungsleitfaden*. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/mum/intern/Dateien/Dokumente/2_Presse_und_Service/Publicationen/Energie/Handlungsleitfaden_Freiflaechensolaranlagen.pdf (19. Januar 2023).
- NABU. 2021. *Der naturverträgliche Ausbau der Photovoltaik - Nutzung von Solarenergie in urbanen und ländlichen Räumen, auf Dächern und in der Fläche*. <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/solarenergie/210421-nabu-infopapier-photovoltaik.pdf> (26. Januar 2023).
- NABU und BUND Baden-Württemberg. 2021. *Positions- und Hinweispapier zur Solarenergie*. <https://baden-wuerttemberg.nabu.de/imperia/md/content/badenwuerttemberg/positionspapiere/2021-07-26-positionspapier-solarenergie-nabu-bund-bw.pdf> (26. Januar 2023).
- Peschel, Rolf, Dr. Tim Peschel, Dr. Martine Marchand, und Jörg Hauke. 2019. *Solarparks - Gewinne für die Biodiversität*. https://www.bne-online.de/fileadmin/bne/Dokumente/20191119_bne_Studie_Solarparks_Gewinne_fuer_die_Biodiversitaet_online.pdf (13. Januar 2023).
- Phillips, Steven J., Robert P. Anderson, und Robert E. Schapire. 2006. „Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions“. *Ecological Modelling* 190(3–4): 231–59.
- Pinto-Ledezma, Jesús N., und Jeannine Cavender-Bares. 2021. „Predicting Species Distributions and Community Composition Using Satellite Remote Sensing Predictors“. *Scientific Reports* 11(1): 16448.
- Plakman, Veerle, Job Rosier, und Jasper van Vliet. 2022. „Solar Park Detection from Publicly Available Satellite Imagery“. *GIScience & Remote Sensing* 59(1): 462–81.
- Raab, Bernd. 2015. „Erneuerbare Energien und Naturschutz - Solarparks können einen Beitrag zur Stabilisierung der biologischen Vielfalt leisten“. <https://agenda21-ffb.de/wp-content/uploads/2015/06/2015-Naturschutz-und-Freiland-PV-ANL.pdf>.
- regionalwerke GmbH & Co. KG. 2023. „EULE - das Prinzip für Anlagenbetreiber | Energieversorgungsunternehmen | Kommunen | Stromkunden | Evaluierungssystem für eine umweltfreundliche und Landschafts-verträgliche Energiewende“. <https://eule-energiewende.de/> (10. Mai 2023).
- Reinermann, Sophie u. a. 2022. „Detection of Grassland Mowing Events for Germany by Combining Sentinel-1 and Sentinel-2 Time Series“. *Remote Sensing* 14(7): 1647.
- Reinermann, Sophie, Sarah Asam, und Claudia Kuenzer. 2020. „Remote Sensing of Grassland Production and Management—A Review“. *Remote Sensing* 12(12): 1949.
- Rossi, Christian u. a. 2021. „Remote Sensing of Spectral Diversity: A New Methodological Approach to Account for Spatio-Temporal Dissimilarities between Plant Communities“. *Ecological Indicators* 130: 108106.
- Schiefer, Felix u. a. 2020. „Mapping Forest Tree Species in High Resolution UAV-Based RGB-Imagery by Means of Convolutional Neural Networks“. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 170: 205–15.

- Schiefer, Felix u. a. 2023. „UAV-Based Reference Data for the Prediction of Fractional Cover of Standing Deadwood from Sentinel Time Series“. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 8: 100034.
- Schwieder, Marcel u. a. 2022. „Mapping Grassland Mowing Events across Germany Based on Combined Sentinel-2 and Landsat 8 Time Series“. *Remote Sensing of Environment* 269: 112795.
- Skidmore, Andrew K. u. a. 2021. „Priority List of Biodiversity Metrics to Observe from Space“. *Nature Ecology & Evolution* 5(7): 896–906.
- Soltani, Salim, Hannes Feilhauer, Robbert Duker, und Teja Kattenborn. 2022. „Transfer Learning from Citizen Science Photographs Enables Plant Species Identification in UAV Imagery“. *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 5: 100016.
- Stenzel, Stefanie u. a. 2014. „Remote sensing of scattered Natura 2000 habitats using a one-class classifier“. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 33: 211–17.
- Technische Universität Ilmenau. 2023. „Flora Incognita | DE – Die Flora Incognita App – Interaktive Pflanzenbestimmung“. <https://floraincognita.de/> (10. Mai 2023).
- Thrän, Daniela u. a. 2020. *Naturschutzfachliches Monitoring des Ausbaus der erneuerbaren Energien im Strombereich und Entwicklung von Instrumenten zur Verminderung der Beeinträchtigung von Natur und Landschaft*. 562. Aufl. DE: Bundesamt für Naturschutz. <https://doi.org/10.19217/skr562> (7. Juni 2023).
- Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie. 2018. *Anleitung zur Kartierung der gesetzlich geschützten Biotope im Offenland Thüringens*. https://umwelt.thueringen.de/fileadmin/001_TMUEN/Unsere_Themen/Natur_Artenschutz/kartieranleitung_biotope_offenland_2_0.pdf (3. Mai 2023).
- Wang, Zhihui u. a. 2019. „Mapping Foliar Functional Traits and Their Uncertainties across Three Years in a Grassland Experiment“. *Remote Sensing of Environment* 221: 405–16.
- Wijesingha, Jayan, Thomas Astor, Damian Schulze-Brüninghoff, und Michael Wachendorf. 2020. „Mapping Invasive *Lupinus Polyphyllus* Lindl. in Semi-Natural Grasslands Using Object-Based Image Analysis of UAV-Borne Images“. *PFG – Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science* 88(5): 391–406.
- Zink, Roland u. a. *Thermographische Kontrolle von Photovoltaikanlagen mittels GPS-gestützter Drohne*. na.

8 Anlage 1 – Habitate, Maßnahmen und technische Parameter

8.1 Habitate

8.1.1 Gras- und Staudenfluren, Blühflächen

Eine häufig zu erwartende Biotopklasse unter Solarfreiflächenanlagen sind Gras- und Staudenfluren.



Abb. 22: Extensives Grünland unter Freiflächenanlagen (Quelle: LUP GmbH)

In dieser Klasse werden alle von Gräsern und/oder Stauden dominierten Flächen verschiedener Feuchtigkeitsstufen zusammengefasst, die weitestgehend gehölzfrei oder gehölzarm sind (Landesumweltamt Brandenburg 2007). Durch Beweidung oder Mahd werden die Flächen offen gehalten und langfristig Nährstoffe entzogen. Dadurch entstehen magere Standorte, die für eine Vielzahl von konkurrenzschwachen Arten Lebensräume darstellen (Hietel, Reichling, und Lenz 2021) (Landesumweltamt Brandenburg 2007). Im Unterschied zu Intensivgrünländern zeichnet sich eine extensive Nutzung durch eine geringe Beweidungsdichte und eine späte Mahd aus. Weitere Grundlagen für eine extensive Nutzung sind ein Verzicht auf Pflanzenschutzmittel und ein geringer Einsatz von Dünger (Badelt u. a. 2020).

Neben der Art und Intensität der Pflege bzw. Bewirtschaftung wird die Artenzusammensetzung auch durch die vorherrschenden Standortverhältnisse stark geprägt. Anhand der Feuchtstufe werden die Grünländer in feuchte, frische oder trockene Wiesen bzw. Weiden unterteilt.

Während unter den Solarmodulen eine regelmäßige Pflege des Grünlandes durch Mahd oder Beweidung unerlässlich ist, um einen Zugang und eine Kontrolle der Module zu gewährleisten und eine Verschattung durch aufwachsende Vegetation zu verhindern, können am Rand eines Solarparks blütenreiche Streifen aus Stauden entstehen, die nur in großen Abständen gemäht oder sogar von der Mahd ausgenommen werden (Raab 2015). Rand- und Blühstreifen bilden wichtige Lebensräume, Rückzugsorte sowie Nist- und Überwinterungsmöglichkeiten für Insekten (Hietel, Reichling, und Lenz 2021). Insbesondere für die Förderung von Bestäuberinsekten (z. B. Wildbienen) sind Flächen mit langandauerndem Blühaspekt von großer Bedeutung (Hietel, Reichling, und Lenz 2021).

Eine diverse Zusammensetzung verschiedener Grünlandbiotop innerhalb der Solaranlage geht in jedem Fall mit einer gesteigerten Artenvielfalt einher, da die unterschiedlichen

Vegetationsstrukturen Lebensräume für verschiedene Arten bilden (NABU 2021). Extensiv genutztes, artenreiches Grünland gehört damit zu den naturschutzfachlich bedeutsamen Biotopen und bildet einen wichtigen Beitrag zur Erhaltung der standorttypischen Tier- und Pflanzenarten (Landesumweltamt Brandenburg 2007) (Hietel, Reichling, und Lenz 2021).

8.1.2 Feuchtbiotope / Wasserflächen

Feuchtbiotope oder Kleinstgewässer (z. B. Tümpel, Teich oder Weiher) können natürlicherweise innerhalb einer Freiflächenanlage vorhanden sein oder durch eine künstliche Anlage entstehen. Die Integration eines Feuchtbiotops in einen Solarpark erhöht die Strukturvielfalt innerhalb des Solarparks und bietet damit z. B. Amphibien, Libellen, Wasserinsekten oder Schnecken einen Rückzugsort und Lebensraum (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2019). An dem Rand der Kleinstgewässer können Röhrichtgesellschaften oder feuchte Hochstaudensäume entstehen, die die Artenvielfalt zusätzlich erhöhen. Feuchtbiotope können als Trittsteinbiotope eine Vernetzung mit dem Umland bewirken. Der Habitatfragmentierung wird so entgegengewirkt und der Biotopverbund gestärkt (Hietel, Reichling, und Lenz 2021).

Für die künstliche Anlage eines Kleinstgewässers oder Feuchtbiotops ist es möglich, das Niederschlagswasser von den Modulen gezielt zu bündeln und zur Speisung des Biotops / Gewässers zu nutzen (Hietel, Reichling, und Lenz 2021).

8.1.3 Anthropogene Rohbodenstandorte und Ruderalfluren

Ruderalflächen, die tiefgreifend durch eine anthropogene Nutzung überprägt sind, eignen sich ebenfalls als Standorte für Freiflächenanlagen, da beim Bau der Anlage nicht auf einen sensiblen Artenbestand Rücksicht genommen werden muss. Rohboden- und Ruderalbereiche entstehen meist nach starken mechanischen Störungen (z. B. Abriss von Gebäuden, Aufschüttungen oder Entsiegelungsmaßnahmen), in deren Zuge natürliche Substrate abgebaut und künstliche aufgeschüttet wurden (Landesumweltamt Brandenburg 2007). Auch Stoffeinträge (z. B. auf Lagerplätzen oder Altlaststandorten) oder Brände können zur Entstehung von Ruderalflächen führen (Landesumweltamt Brandenburg 2007). Anthropogene Rohbodenflächen sind charakterisiert durch fehlenden oder sehr schütterten Vegetationsbewuchs. Bei fortschreitender Sukzession entwickeln sich auf den gestörten Böden heterogene Pionier-, Gras- oder Staudenfluren (Badelt u. a. 2020).

8.1.4 Trockenbiotope / Sand-, Lesestein-, Totholzhaufen

Neben den bereits im Abschnitt „Gras- und Staudenfluren“ beschriebenen Grünlandarten trockener Standorte können punktuelle oder längliche Trockenbiotope die Strukturvielfalt in einer Freiflächenanlage zusätzlich erhöhen. Zu nennen sind hier insbesondere Sand-, Lesestein- oder Totholzhaufen, Steinwälle oder Trockenmauern, deren Anlage und Integration in einen Solarpark aufgrund ihrer platzsparenden Form einfach umzusetzen ist (Hietel, Reichling, und Lenz 2021; Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2019).



Abb. 23: Trockenbiotope in Freiflächenanlagen (Quelle: LUP GmbH)

Für bestimmte Tierarten, z. B. Eidechsen, Wildbienen oder Heuschrecken, bilden die genannten Trockenbiotope durch die vielen geschützten Hohlräume und Nischen Rückzugsorte. Das Wärmespeichervermögen der Steine zieht die Tiere tagsüber zum Sonnen an und bietet nachts einen warmen Ruheplatz (Hietel, Reichling, und Lenz 2021). Auch Schuttflächen oder Rohbodenbereiche, die an Störstellen entstehen, können Lebensräume für Insekten sein. Trockenbiotope können ebenfalls als Trittsteinbiotope den Biotopverbund stärken (Hietel, Reichling, und Lenz 2021).

8.1.5 Gehölze

Laubgebüsche, Hecken, Baumreihen oder Baumgruppen können am Rand der Freiflächenanlage vorkommen oder bei geringer Höhe auch in freigehaltenen Bereichen im Modulfeld integriert sein. Die genannten Gehölze sind meist extensiv genutzte Biotope, die durch ihren Strukturreichtum Rückzugsorte und Nistmöglichkeiten für viele Tierarten darstellen. Aus naturschutzfachlicher Sicht sind Gehölzbiotope insbesondere dann wertvoll, wenn ein standortgerechter und naturraumtypischer Artenbestand vorliegt (Landesumweltamt Brandenburg 2007). Gehölze bilden als punkt- oder linienförmige Biotope Trittsteine im Biotopverbund (Landesumweltamt Brandenburg 2007).

Das folgende Beispiel zeigt den City-Solarpark in Kaiserslautern, in dem mittig eine Gehölzinsel integriert wurde und auch am Rand Gehölze vertreten sind.



Abb. 24: Gehölzinseln in Freiflächenanlagen (Quelle: LUP GmbH)

8.1.6 Heideflächen

Heideflächen sind naturschutzfachlich sehr wertvolle Biototypen, die auf nährstoffarmen Böden vorkommen. Dies können Böden auf Buntsandstein oder Schiefer im Süden von Deutschland sein oder Sandböden in Norddeutschland (Geidezis, Leitzbach, und Schlumprecht 2015). Die typische Heidevegetation ist dominiert von niedrigen Sträuchern wie z. B. Ginster-Arten oder Heidekraut (Landesumweltamt Brandenburg 2007).

8.2 Pflege- und Entwicklungsmaßnahmen

8.2.1 Mahd

Durch die mechanische Entfernung der Vegetation im Zuge der Mahd können artenreiche Grünländer langfristig erhalten werden (Hietel, Reichling, und Lenz 2021). Die Mahdzeitpunkte und Frequenzen sollten nach den standortspezifischen Gegebenheiten und der Artenzusammensetzung festgelegt werden. Insbesondere bei Vornutzung als Acker kann durch mehrmalige Mahd ein Standort gezielt ausgehagert und eine Reduktion der Nährstoffe im Boden erreicht werden (Dullau 2022).

Es empfiehlt sich, die Mahd räumlich und zeitlich gestaffelt durchzuführen (z. B. jede zweite Reihe), um ein durchgängiges Blüh- und Nahrungsangebot zu gewährleisten (Hietel, Reichling, und Lenz 2021; NABU 2021). Teilbereiche können auch vollständig von der Mahd ausgenommen werden, um Rückzugsorte, Überwinterungsquartiere und Nahrungsquellen für Vögel und Insekten zu erhalten (Hietel, Reichling, und Lenz 2021). Eine Mahd während der Brutzeit bodenbrütender Vogelarten sollte vermieden werden (NABU 2021). Nicht zuletzt ist die Pflege des Grünlandes auch nötig, um einen einfachen Zugang zur Kontrolle der Module zu gewährleisten.

Auch eine Mulchmahd, bei der das Schnittgut nach der Mahd nicht von der Fläche entfernt wird, ist für Grünlandflächen möglich (Raab 2015). Durch diese Pflegemaßnahme verbleiben die Nährstoffe am Standort und das Mulchgut beschattet die Vegetation (Anders u. a. 2004). Durch das Mulchen können bestimmte Arten gefördert, andere eher geschwächt werden – die Anwendung dieser Maßnahme ist demnach je nach der standortspezifischen Artenzusammensetzung gut abzuwägen (Anders u. a. 2004).

8.2.2 Beweidung

Auch die Beweidung trägt durch das Offenhalten der Fläche zu einer langfristigen Erhaltung von Grünland bei. Eine Beweidung bringt den Vorteil mit sich, dass der Aufwuchs nur schrittweise entfernt wird und das Blühangebot daher durchgehend erhalten bleibt (Hietel, Reichling, und Lenz 2021). Wird die Beweidung zusätzlich räumlich und zeitlich gestaffelt, kann ein durchgängiges Blüh- und Nahrungsangebot sichergestellt werden (NABU 2021). Weiterhin werden durch die Tiere Mikrostrukturen wie offene Bodenstellen und Störstellen geschaffen, die von konkurrenzschwachen Arten zur Keimung benötigt werden oder für einige Tierarten (z.B. Wildbienen) wichtige Rückzugsorte darstellen (Hietel, Reichling, und Lenz 2021). Über das Fell, die Klauen und den Kot der Tiere, können Samen über die Fläche verteilt und Arten leichter verbreitet werden (Hietel, Reichling, und Lenz 2021).

Um eine Beweidung zu ermöglichen, sollten alle Kabel zum Schutz verrohrt und die Modultische ausreichend hoch installiert werden (NABU 2021). Auch zur Akzeptanz und Attraktivität einer Solaranlage kann eine Tierhaltung einen positiven Beitrag leisten (Hietel, Reichling, und Lenz 2021).

8.2.3 Anlage von Habitatelementen

Zusätzlich zur Erhaltung der bereits vorhandenen Lebensräume, kann durch eine Anlage von Habitatelementen eine ökologische Aufwertung der Flächen erreicht werden. Durch die Integration von z. B. Gehölzen, Kleinstgewässern, punktuellen oder linienförmigen Trockenbiotopen, aber auch künstlichen Habitatelementen wird die Strukturvielfalt auf der Fläche gesteigert und zusätzliche Lebensräume geschaffen (Peschel u. a. 2019). Solarparks sollten so angelegt sein, dass auch die inneren mit Solarmodulen bebauten Bereiche von Korridoren und kleinen Habitatinseln durchzogen sind, um auch diese Bereiche als Lebensraum attraktiver zu machen (NABU 2021). Gleichzeitig wird so der Biotopverbund gestärkt (NABU und BUND Baden-Württemberg 2021).

Der Nabu empfiehlt die Anlage von mindestens 3 m-breiten mittel- bis hochwüchsigen Staudensäumen und naturnah gestalteten Hecken mit einer Mindestbreite von 6 m innerhalb der Anlage (NABU 2021). Hecken sind wichtige Nahrungs- und Bruthabitate für Gebüsch- und Heckenbrüter (Demuth u. a. 2019).

8.3 Technische Parameter

8.3.1 Flächenbedarf und Anordnung

Die Modultische bewirken mikroklimatische Veränderungen durch eine Verschattung und Beeinflussung des Niederschlages (Badelt u. a. 2020; Demuth u. a. 2019; NABU 2021). Die Temperatur ist unter den Modulen im Vergleich zu den umgebenden Flächen im Sommer niedriger und im Winter etwas höher (Armstrong, Ostle, und Whitaker 2016). Der Niederschlag ist auf den übershirmten Bereichen reduziert und die Versickerung räumlich in den Randbereichen der Module konzentriert. Die Artenzusammensetzung und Blühphänologie können sich damit durch die unregelmäßige Temperatur- und Niederschlagsverteilung unter und zwischen den Modulen unterscheiden (Badelt u. a. 2020). Größere Montagefugen zwischen den Modulen gewährleisten eine bessere Niederschlagsverteilung und ermöglichen einen Lichteinfall (Kompetenzzentrum Naturschutz und Energiewende 2021; NABU 2021).

Neben der Gesamtfläche ist auch der Reihenabstand ein entscheidender Faktor für die Ausprägung der Biodiversität. Breite sonnenbeschienene Streifen zwischen den Modulreihen sind insbesondere für wärmeliebende Insekten- und Reptilienarten wichtig, die typisch für offenere und

vegetationsärmere Standorte sind (NABU 2021). Der Abstand zwischen den Modulreihen ist nicht zuletzt notwendig, um eine gegenseitige Verschattung der Module zu vermeiden.



Abb. 25: Unterschiedlicher Reihenabstand in zwei Solarparks auf dem ehemaligen Flugplatz Fürstenwalde

(Quelle: google earth, Bilder © 2023 GeoBasis-DE/BKG, GeoContent, Maxar Technologies, Kartendaten © 2023 GeoBasis-DE/BKG (©2009))

Die Anlagengröße hat ebenso eine Auswirkung auf die Entwicklung der Biodiversität. Kleinere Anlagen können als Trittsteinbiotope etabliert werden, während größere Anlagen ausreichend groß sein sollten, um den Aufbau einer gesamten Population (z. B. von Insekten, Eidechsen oder Vogelarten) zu ermöglichen (NABU 2021).

8.3.2 Höhe und Ausrichtung der Modultische

Die Module einer Freiflächenanlage sind auf Metallgestellen aufgeständert. Je höher die Module aufgeständert sind, desto mehr Licht kann auf die unter den Modulen gelegenen Flächen gelangen. Auch die Verteilung der Niederschläge ist bei höheren Modulen ausgeglichener, da mehr Wasser unter die Module gelangen kann (Badelt u. a. 2020).

Neben der Höhe der Modultische beeinflusst auch die Ausrichtung der Module den Schattenverlauf (Demuth u. a. 2019).

8.3.3 Versiegelung

Versiegelte Flächen können innerhalb eines Solarparks durch die Verankerung der Metallgestelle im Boden, kleine Betriebsgebäude sowie durch die Anlage von Fahrwegen entstehen (NABU 2021). Stärker versiegelte Flächen heizen die Anlage in den Sommermonaten unnötig stark auf. Der Versiegelungsgrad der Wege sollte so gering wie möglich gehalten werden. Beispielsweise können Wege mit Schotterrasen angelegt und naturnah gestaltet werden (Hietel, Reichling, und Lenz 2021).

8.3.4 Umzäunung / Einbindung in die Umgebung

Auch wenn die Anlage meist aus Sicherheitsgründen eingefriedet werden muss, können für eine optimale Einbindung in die Umgebung zur Erhaltung des Biotopverbundes verschiedene Dinge beachtet werden (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2019; NABU und BUND Baden-Württemberg 2021). Der Zaun sollte zunächst keine visuelle Barriere darstellen, sondern so transparent wie möglich sein (Ministerium für Umwelt, Klima und

Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2019). Für Kleinsäuger und Laufvögel kann durch einen ausreichenden Abstand des Zauns zum Boden oder durch breitere Zaunmaschen in Bodennähe eine Durchlässigkeit gewährt werden (Demuth u. a. 2019; NABU 2021). Der Einsatz von Stacheldraht an der Unterkante des Zauns sollte vermieden werden (Bundesverband Solarwirtschaft e.V. und NABU 2021).

Insbesondere für größere Säugetiere (z.B. Wölfe oder Rehe) stellen eingezäunte Solarparks eine Barriere dar (NABU 2021). Die Flächengröße der Anlage und die Zaunlänge sollten daher bestimmte Maximalwerte nicht überschreiten, um eine Barrierewirkung für wandernde Tiere zu vermeiden (Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg 2019). Eingezäunte Wanderkorridore zwischen oder innerhalb der Anlage können einen Durchgang für größere Säugetiere ermöglichen (Badelt u. a. 2020).

9 Anlage 2 – Ergebnisse Datenrecherche

Bundesland	Datenart	Datenursprung	Datenformat	kostenlose Verfügbarkeit	Aufnahmzeitpunkt	Aktualisierungszyklus	Punktdichte bzw. Gitterweite	Höhen Genauigkeit	Kontakt	Zusätzliche Information	
Baden-Württemberg	Laserscandaten	Landesamt für Geoinformation und Landentwicklung	LAZ, LAS, ASCII	Nein	2016-2021		8 Punkte pro m ²	+ - 15 cm	www.lgl-bw.de Telefon: 0711 95980-200 E-Mail: geodaten@lgl.bwl.de	Downloadlink bis 5 GB, bei größeren Datenmengen Datenträger	
	DGM		ASCII		2016-2021		0.25 m	+ - 15 cm		DOM1 ab 2023	
	bDOM		LAZ, LAS, ASCII		2021-2022		0.2 m	+ - 50 cm			
	DOP (RGBI)		GEOTIFF/ TIFF mit TFW	Nein	ab 2011	teilw. ab 2016	10 cm	+ - 25 cm (Lage)		Winterbefliegung, Übergabemodalität Datenträger	
					ab 2009	2-Jahres-Turnus	20 cm	+ - 50 cm (Lage)		Sommerbefliegung, ab 2020 als TrueDOP	
Bayern	Laserscandaten	Landesamt für Digitalisierung, Breitband und Vermessung	LAZ, LAS, ASCII	Nein	2013-2022	2-Jahres-Turnus	min. 4 Punkte pro m ²	± 0.1 m	Telefon: +49 89 2129-1111 E-Mail: service@geodaten.bayern.de		
	DGM		GEOTIFF, ASCII	Ja			1 m	± 0.2 m			
	DOM		LAZ	Nein	2021-2022		0.4 m x 0.4 m	meist < ± 1.5 m		Auf Anfrage erhältlich für Mindestbetrag und ggf. Zeitgebühr	
	DOP (RGBI)		GEOTIFF, jpg	Nein			20 cm	Abschnittsweise verfügbar bei Anfrage			
				Ja			40 cm			ab 2018 als TrueDOP	
Berlin	Laserscandaten	Senatsverwaltung für Stadtentwicklung und Wohnen	LAS, LAZ	Ja	2021		10 Punkte pro m ²	-	Thomas Tresp Telefon: 030-90139-5320 E-Mail: thomas.tresp@senstadt.berlin.de		
	DGM		XYZ, TIFF	Ja	2021		1 m	-			
	DOM		XYZ	Ja	2021		jährlich	1 m		± 10 m	
	DOP (RGBI)		ECW	Ja	2022		jährlich	20 cm			Sommerbefliegung 2020 (RGB); ab 2020 als TrueDOP
Brandenburg	bDOM	Landesvermessung und Geobasisinformation Brandenburg	XYZ-ASCII	Ja	2016-2019	3-Jahres-Turnus	1 m	± 0.5 m	Telefon: +49 331 8844-123 E-Mail: kundenservice@geobasis-bb.de		
	DGM		XYZ-ASCII	Ja	2011-2021		1 m	± 0.3 m			
	DOP (RGBI)		TIF, jpeg	Ja	2020-2022	3-Jahres-Turnus	0,20 cm	± 0.2 m			

Machbarkeitsstudie zur Erstellung eines satellitengestützten Monitorings von Solarparks

Bundesland	Datenart	Datenursprung	Datenformat	kostenlose Verfügbarkeit	Aufnahmezeitpunkt	Aktualisierungszyklus	Punktdichte bzw. Gitterweite	Höhen Genauigkeit	Kontakt	Zusätzliche Information
Bremen	Laserscandaten	Landesamt Geoinformation Bremen	XYZ, LAS, TIFF-TFW, GEOTIFF	Nein	2017	landesweite Aktualisierung alle 3 Jahre	1 m, 5 m		Telefon: 0421 361 78680 E-Mail: geodatenservice@geo.bremen.de	große Datenmengen -> Übergabemodalität Datenträger
	DOM									
	DGM									
	bDOM									
	DOP (RGBI)		TIFF	2021	0.1 m, 0.2 cm (könnte geringere Auflösung als DOP)	0.1 m, 0.2 m				
Hamburg	DGM	Landesbetrieb Geoinformation und Vermessung Hamburg	ASCII	Ja	2021		1 m	± 15 cm	Telefon: +4940115 E-Mail: info@gv.hamburg.de	
	bDOM		ASCII	Ja	2020		1 m			
	DOP		JPG	Ja	2021		0.2 m			
Hessen	Laserscandaten	Hessische Verwaltung für Bodenmanagement und Geoinformation	LAS, LAZ	Nein	2009-2020		min. 4 Punkte pro m ²	± 0.15 m	Telefon: +49 611 535-5526 E-Mail: vertrieb-geobasisdaten@hvbghessen.de	
	DOM		XYZ-ASCII	Ja			1 m			
	DGM			1 m						
	DOP (RGBI)		JPEG	Ja	2020-2021	2-Jahres-Turnus	0.2 cm	± 1m		
Mecklenburg-Vorpommern	Laserscandaten	Landesamt für innere Verwaltung, Amt für Geoinformation, Vermessungs- und Katasterwesen	LAS, ASCII	Nein	seit 2012	jährlich	2-5 Punkte pro m ²		Telefon: 0385-588-56860 E-Mail: geodatenservice@laiv-mv.de	
	DOM		ASCII, TIFF, DTM		2009-2018	jährlich	1 m, 2m			
	DGM		ASCII, TIFF, DTM		2011-2020	jährlich	1 m, 2m			
	DOP (CIR)		TIFF		seit 2004	jährlich	0.1 cm, 0.2 cm, 0.4 cm			

Machbarkeitsstudie zur Erstellung eines satellitengestützten Monitorings von Solarparks

Bundesland	Datenart	Datenursprung	Datenformat	kostenlose Verfügbarkeit	Aufnahmezeitpunkt	Aktualisierungszyklus	Punktdichte bzw. Gitterweite	Höhen-genauigkeit	Kontakt	Zusätzliche Information
Niedersachsen	Laserscandaten	Landesamt für Geoinformation und Landesvermessung Niedersachsen	LAZ	Nein	2015-2021		≥ 4 Punkte pro m ²	≤ 0.15 m	Telefon: 0511 64609-333 E-Mail: vertrieb- lgn@lgn.niedersachsen.de	Übergabe per Downloadlink oder über Datenträger
	DOM		ASCII				1 m			
	DGM		ASCII							
	DOP (RGBI)		TIFF		2020-2022	3-Jahres-Turnus	0.2 m, 0.4 m	± 0.4 m, ± 0.8 m (Lage)		
Nordrhein-Westfalen	Laserscandaten	Bezirksregierung Köln	LAS, LAZ	Ja	2018-2022	5-Jahres-Turnus	4 - 10 Punkte pro m ²	± 0.15 m	Telefon: +49(0)221-147-4994 E-Mail: geobasis@bezreg-koeln.nrw.de	
	DGM		XYZ-ASCII	Ja			1 m	± 0.20 m		
	bDOM		LAS, LAZ, TIFF	Ja	2020-2022	2-Jahres-Turnus	0,5 m	± 0.50 m		
	DOP (RGBI)		JPEG2000	Ja	2020-2022		0.10 m	± 0.3 m (Lage)		
Rheinland-Pfalz	Laserscandaten	Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation	ASCII	Nein	2014-2022	4-Jahres-Turnus	ca. 4 Punkte pro m ²	± 0.15 m	Petra Aleff Telefon: 0261 492-170 Andreas Becker Telefon: 0261 492-515 Mail:geodaten@vermkv.rlp.de	
	bDOM		XYZ-ASCII	Nein		derzeit nicht verfügbar	0, 5 m	± 1 m		
	DGM		XYZ-ASCII, GeoTIFF	Nein	2014-2022	4-Jahres-Turnus	1 m, 5 m	± 0.1 m		
	DOP (RGBI)		GeoTIFF, jpeg2000	Ja (nur DOP40)	2020-2022	2-Jahres-Turnus	0.4 m	± 1 m (Lage)		
Saarland	Laserscandaten	Landesamt für Vermessung, Geoinformation und Landentwicklung Saarland	LAS, LAZ, XYZ-ASCII	Nein	2015-2016		4 Punkte pro m ²	± 0.15 m	Tobias Harth Telefon: 0681 9712-314 Sybille Brendel Telefon: (0681) 9712-278 E-Mail: shop@lvgl.saarland.de	
	DOM		GeoTIFF, ASCII-XYZ, ISO, TIN				1 m, 2 m			
	DGM									
	DOP (RGBI)		TIFF, JPG		2022	jährlich	0.2 m	± 0.4 m (Lage)		

Machbarkeitsstudie zur Erstellung eines satellitengestützten Monitorings von Solarparks

Bundesland	Datenart	Datenursprung	Datenformat	kostenlose Verfügbarkeit	Aufnahmezeitpunkt	Aktualisierungszyklus	Punktdichte bzw. Gitterweite	Höhen- genauigkeit	Kontakt	Zusätzliche Information	
Sachsen	Laserscandaten	Staatsbetrieb Geobasisinformation und Vermessung Sachsen	LAS, LAZ	Ja	2015-2022	6-Jahres-Turnus	4 Punkte pro m ²	± 0.15 m	Telefon: 0351 8283-8420 E-Mail: geodaten@geosn.sachsen.de		
	DOM		ASCII	Ja			1 m				
	DGM		ASCII	Ja			1 m, 2 m				
	DOP (RGBI)		TIFF, JPEG	Ja	2021-2022	2-Jahres-Turnus	0.20 m	± 0.4 m (Lage)	0351 8283-8420 servicedesk@geosn.sachsen.de		
Sachsen-Anhalt	Laserscandaten	Landesamt für Vermessung und Geoinformation Sachsen-Anhalt	ASCII	Nein	2016 - 2021	jährlich	3 - 5 Punkte pro m ²	± 0.6 m	Telefon: 0391 567-8585 E-Mail: service.lvermgeo@sachsen-anhalt.de		
	bDOM			Ja			0.2 m				
	DOM			Ja			1 m, 2m			± 0.15 - 0.5 m	DOM2 kostenfrei verfügbar
	DGM			Nein			1 m, 2 m, 5 m			± 0.15 - 0.5 m	DGM2 und DGM5 kostenfrei verfügbar
	DOP		TIFF	Ja	2020-2022	2-Jahres-Turnus	0.2 m, 0.4 m, 0.10 m			ab 2019 als TrueDOP, DOP10 nur für Teilfläche und mit Nutzungsbeschränkungen	
Schleswig-Holstein	Laserscandaten	Landesamt für Vermessung und Geoinformation Schleswig-Holstein	ASCII	Nein	2021-2022	2-Jahres-Turnus (ab 2020)	3 - 4 Punkte pro m ²	± 0.15 m	Vertrieb Geobasisdaten Telefon: 0431 383-2110 E-Mail: Poststelle@LVerGeo.lands-h.de		
	DGM		ASCII				1 m, 5 m	± 0.15 m			
	bDOM		LAS/LAZ, TIFF				0.2 m	± 0.5 m			
	DOP		TIFF				0.2 m, 0.4 m			seit 2019 als TrueDOP; Abgabe über Downloadlink oder Festplatte	
Thüringen	Laserscandaten	Landesamt Bodenmanagement und Geoinformation	LAZ	Ja	2017 - 2022		>10 Punkte pro m ²	± 0.15 m	Telefon: +49 (0)361 574176-864 E-Mail: support.geoportal@tlvermgeo.thueringen.de		
	DOM		ASCII				1 m				
	DGM		ASCII				1 m				
	DOP		TIFF	Ja	2020	2-Jahres-Turnus	0.2 m				

Machbarkeitsstudie zur Erstellung eines satellitengestützten Monitorings von Solarparks

Bundesland	Datenart	Datenursprung	Datenformat	kostenlose Verfügbarkeit	Aufnahmzeitpunkt	Aktualisierungszyklus	Punktdichte bzw. Gitterweite	Höhen Genauigkeit	Kontakt	Zusätzliche Information
Deutschland gesamt	DOP	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie	TIFF, JPEG	Nein	2017-2022	variiert	0.2 m	variiert	Telefon:+49 (0)341 5634 333	Übersichtliche deutschlandweite Zusammenfassung der verfügbaren DOPs
							0.4 m			