

Forschungsprojekt

Landwirtschaftlicher Wert von Solarparks

Projektleitung:

Dr. Dina Hamidi (Universität Göttingen),
Dr. Christoph Hütt (Universität zu Köln)

FORSCHUNGS-
BERICHT

IMPRESSUM

Herausgeber:

Bundesverband Neue Energiewirtschaft (bne) e.V.

Hackescher Markt 4, 10178 Berlin

Tel.: +49 30 400 548-0

mail@bne-online.de

www.bne-online.de

LinkedIn: Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V. (bne)

YouTube: @bneonline2172

V. i. S. d. P.:

Robert Busch

Wissenschaftliche Projektleitung:

Dr. Dina Hamidi, Fachbereich Graslandwissenschaften, Universität Göttingen

Dr. Christoph Hütt, Geografisches Institut, Universität zu Köln

Redaktion:

Alice Brüssel-Kurbanov, Bernhard Strohmayer, Alina Uppenkamp

Bildnachweise:

Cover: Wattmanufactur GmbH & Co. KG

Seite 3: BayWa r.e. AG (oben), Dr. Christoph Hütt (unten)

Seite 5: Dr. Dina Hamidi, Dr. Christoph Hütt

Seite 6: Wattmanufactur GmbH & Co. KG

Seite 7: EnBW AG / Paul Langrock

Seite 10: Dr. Dina Hamidi

Seite 11: Dr. Christoph Hütt

Seite 12: Dr. Dina Hamidi

Seite 15: Dr. Dina Hamidi

Seite 17: BayWa r.e. AG (oben), EnBW AG / Paul Langrock (unten)

Seite 18: EnBW AG / Paul Langrock

Seite 20: Dr. Christoph Hütt

Seite 21: Wattmanufactur GmbH & Co. KG

Seite 22: EnBW AG / Paul Langrock

Rückseite: Wattmanufactur GmbH & Co. KG

Lizenz:

CC BY-NC-ND 4.0

Stand:

März 2026

INHALT

EINLEITUNG	4
HINTERGRUND UND FORSCHUNGSBEDARF	4
ZIELE DES FORSCHUNGSPROJEKTS	4
FORSCHUNGSFRAGEN	5
FORSCHUNGSTEAM UND AUFGABENVERTEILUNG	5
PROJEKTVERLAUF UND METHODIK	6
VERSUCHSDESIGN	6
METHODIK DER DATENERHEBUNG	9
EXKURS: LASERSCANNING MIT „LIDAR“ 3D SCANNING	11
ZEITPLAN DES PROJEKTS	12
STAND DER FORSCHUNG UND ERGEBNISSE	13
SCHLUSSFOLGERUNGEN	20
NUTZEN FÜR DIE PRAXIS	21
PUBLIKATIONSLISTE	22
VORSCHAU KÜNFTIGE PUBLIKATIONEN (2026/2027)	22



EINLEITUNG

HINTERGRUND UND FORSCHUNGSBEDARF

In Deutschland werden **bis 2040** etwa **280.000 ha für PV-Freiflächenanlagen** benötigt, wodurch auch **landwirtschaftliche Flächen zunehmend für Solarparks** genutzt werden.¹ Gleichzeitig steigt der Flächenbedarf für Nahrungsmittelproduktion und Biodiversität, sodass eine **effiziente und multifunktionale Nutzung** unverzichtbar wird.

Nahezu **alle modernen Solarparks** werden heutzutage auf **vormals landwirtschaftlich bewirtschaftetem Grünland oder Ackerland** errichtet, das trotzdem wichtige **Ökosystemleistungen** wie Futterproduktion, Kohlenstoffspeicherung und **Lebensraum** für viele **Pflanzen- und Wildtierarten** erbringt. Auch findet oft **Beweidung** statt. Dennoch werden diese Flächen bisher **nicht klar der Landwirtschaft zugeordnet**, was zu Unsicherheiten und Widersprüchen bei Begrifflichkeiten, Förderlogiken und der Bewertung ihrer Leistungen führt.

Bisherige Forschung zu PV Freiflächenanlagen konzentriert sich stark auf **Agri PV im Ackerbau**; gezielte Untersuchungen zu **Grünland PV**, insbesondere auf kohlenstoffreichen Böden oder Standorten mit niedriger Feuchtestufe, **fehlen weit-**

gehend. Daten zu Biodiversität, Wasserhaushalt, Kohlenstoffdynamik sowie agronomischen Kennzahlen unter PV-Modulen sind lückenhaft, vor allem für Grenzstandorte der Lebensmittelproduktion.

Methodisch bestehen **Lücken bei der flächendeckenden Erfassung von Biomasse** unter Modulen, weil **klassische UAV²** (bswp. Drohnen) und **Satellitenansätze durch die Modulaufständerung begrenzt** sind. Innovative **handheld-LiDAR-Systeme** (s. Seite 11) und die Kombination von Fernerkundung mit punktuellen Referenzmessungen bieten hier ein erhebliches Entwicklungspotenzial.

Die **Forschung** im Projekt soll auch einen **Beitrag** dazu leisten, **Synergien** zwischen der **Flächennutzung für PV-Freiflächenanlagen** und dem **Sektor Landwirtschaft** zu zeigen.

Die Forschung im Projekt soll auch einen Beitrag dazu leisten, Synergien zwischen der Flächennutzung für PV-Freiflächenanlagen und dem Sektor Landwirtschaft zu zeigen.

ZIELE DES FORSCHUNGSPROJEKTS

Das Projekt verfolgte das übergeordnete Ziel, den **landwirtschaftlichen Wert von Grünlandflächen in Solarparks** umfassend zu erfassen und sichtbar zu machen. Dazu sollten **agronomische, ökologische und mikroklimatische Effekte** der PV-Module auf Grünland an **kohlenstoffreichen und trockenheitsgefährdeten Standorten** systematisch untersucht werden.

Konkret sollten **Kennzahlen zu Biomasseproduktion und -qualität, Wasserhaushalt, Bodentemperatur, Lichtverfügbarkeit und Vegetationszusammensetzung** in Solarparks erarbeitet werden, um die dort erbrachten **Ökosystemleistungen quantitativ** zu beschreiben.

Ein weiteres Ziel war es, die **Integrierbarkeit von Grünland-PV** in bestehende landwirtschaftliche Nutzungsformen (z. B. Beweidung mit Schafen) sowie in **Agrarumwelt und Klimamaßnahmen** zu bewerten. Hierzu wurden auch **Effekte der neuartigen Weideumwelt** unter Modulen auf das **Verhalten der Tiere** und das **Futterangebot** analysiert.

Basierend auf den Ergebnissen sollen **Empfehlungen entwickelt** werden, wie **Standortwahl, Anlagengestaltung** (Reihenabstände, Höhe, Dichte der Module) und **Flächenmanagement** so ausgestaltet werden können, dass **Synergien zwischen Energieerzeugung, Landwirtschaft und Biodiversität maximiert** werden.

¹Siehe dazu <https://sonne-sammeln.de/wie-viel-flaeche-brauchen-solarparks/>
²UAV = Unmanned Aerial Vehicle (dt.: Unbemanntes Luftfahrzeug)

FORSCHUNGSFRAGEN

1. Wie unterscheiden sich Biomasse und Futterqualität von Grünland unter, neben und außerhalb von PV-Modulen auf kohlenstoffreichen Böden und trockenen Standorten?
2. Welche Effekte haben PV Module auf Mikroklima, Bodenfeuchte, Bodentemperatur und Lichtverhältnisse, und wie wirken sich diese Faktoren auf Vegetationsentwicklung und Ökosystemleistungen des Grünlands aus?
3. In welchem Umfang lässt sich die oberirdische Grünlandbiomasse unter PV Anlagen mit innovativen LiDAR basierten Verfahren ohne Entnahme und flächendeckend bestimmen, und wie zuverlässig sind diese Methoden im Vergleich zu klassischen Referenzmessungen?
4. Wie beeinflusst die technische Ausgestaltung der Anlagen (z.B. Modulhöhe, Reihenabstand, Anlagendichte) die agronomischen und ökologischen Potenziale von Grünland PV und deren Nutzbarkeit in landwirtschaftlichen Systemen?
5. Welche Auswirkungen hat die durch PV Module geschaffene Weideumwelt auf das Verhalten und Wohlergehen der Weidetiere?

FORSCHUNGSTEAM UND AUFGABENVERTEILUNG

Dr. Dina Hamidi (Universität Göttingen) leitete die **agrarwissenschaftlichen Arbeiten**, einschließlich Flächenauswahl, Vegetationsaufnahmen und Auswertung der Grünlandnutzung.

Dr. Christoph Hütt (Universität zu Köln) verantwortete die Entwicklung und Anwendung von **LiDAR und Fernerkundungsmethoden** zur flächendeckenden Erfassung der Grünlandbestandsparameter.

Mit seiner **Initiative „Sonne Sammeln“** unterstützte der **Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V.** das Forschungsteam, indem er den **Kontakt zu den Betreibern** von Praxisanlagen herstellte und die Forschungsarbeit sowie deren **Ergebnisse in Politik, Verwaltung und Fachöffentlichkeit diskutiert**.

**Dr. Dina Hamidi (Universität Göttingen) und
Dr. Christoph Hütt (Universität zu Köln)**



PROJEKTVERLAUF UND METHODIK

VERSUCHSDESIGN

Das Projekt kombinierte **Beobachtungen in bestehenden Solarparks** mit Versuchen auf ausgewählten **Modellflächen**, um Effekte von PV-Anlagen auf Grünland systematisch zu erfassen. Dazu wurden **unterschiedliche Standorttypen** (z. B. kohlenstoffreiche Böden, trockene Grünlandstandorte) und Anlagengestaltungen (Modulhöhe, Reihenabstände, Bedeckungsgrad) gegenübergestellt und über **mehrere Vegetationsperioden** wiederholt untersucht.

Konkret wurden an **fünf verschiedenen Standorten PV-Freiflächenanlagen** untersucht:

- **Solarpark Lottorf**, Schleswig-Holstein
- **Solarpark Klein-Rheide**, Schleswig-Holstein
- **Solarpark Gottesgabe**, Brandenburg
- **Solarpark Lauterbach**, Hessen
- **Versuchssolarpark Dwergte**, Niedersachsen

Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass **heterogene Untersuchungsflächen** behandelt wurden. Die Probenahmen und Untersuchungen fanden jeweils zu mehreren Zeitpunkten statt, siehe **Kapitel „Stand der Forschung und Ergebnisse“** für detaillierte Angaben.

Zur Datenerhebung wurden **Vegetationsaufnahmen, Biomasse- und Futterqualitätsmessungen, Bodensensoren für Feuchte, Temperatur und Licht sowie LiDAR-gestützte Fernerkundungsverfahren** eingesetzt. Klassische **Ernteschnitte** und **Rising-Plate-Meter-Messungen** dienten als **Referenz**, um aus den 3D-LiDAR-Daten verlässliche Kennzahlen zu **Bestandsentwicklung und Futterangebot** im Grünland von Solarparks abzuleiten.





Das **Versuchsdesign** baute auf einer **Unterteilung der Untersuchungsflächen** in verschiedene **Zonen** auf. Hintergrund ist, dass die **Module** einen sehr **heterogenen Einfluss** haben, je nachdem, an welcher Position die darunterliegende Grasnarbe analysiert wird. Um den Effekt umfassend abbilden zu können, wurden daher die einzelnen **Positionen systematisch erfasst**. Bisherige Forschung in diesem Gebiet konzentrierte sich häufig nur auf Modul- und Zwischenraum. Das hier **angewandte Versuchsdesign** ist demnach ein **Alleinstellungsmerkmal**.

Die Bereiche unter bzw. zwischen den Modulreihen wurden in die Zonen

- **Gap** (Lücke zwischen Modulreihen)
- **Halfshade** (Bereich unter der oberen Modul- kante)
- **Shade** (Bereich unter dem Modul)
- **Edge** (Bereich unter der Unterkante des Moduls)

unterteilt (s. blaue Markierung in Abbildung 1).

Um den Effekt der einzelnen Positionen besser ein- ordnen zu können, wurden **Kontrollbereiche** inner- halb des jeweiligen Solarparks gewählt, die nicht vom Schatten der Module beeinflusst waren (s. gelbe Markierung in Abbildung 1). Ein **direkter Ver- gleich zwischen Kontroll- und Untersuchungs- bereichen** war möglich, da die Flächen in der Ver- gangenheit alle **gleich bewirtschaftet** wurden, also eine **einheitliche Ausgangslage** gegeben war.

Eine **Besonderheit** stellte das **Versuchsdesign im Solarpark Klein Rheide** dar, da hier zusätzlich so- genannte „**Fenster**“ in den Modulreihen vorhan- den waren, wo jeweils **keine Module auf der Aufstän- derung** angebracht waren. Die **Vegetation unter diesen Fenstern** wurde daher in diesem Solarpark **separat betrachtet** (s. lila Markierung in Abbildung 1). Wie die Abbildung zeigt, wirkt sich der **verän- derte Lichteinfall** auch auf Bereiche aus, die nicht direkt unter den ‚Fenstern‘ liegen. Das Forschungs- team berichtete nach den Beprobungen von einer sichtbar erhöhten Heterogenität des Pflanzenbe- standes durch dieses Gestaltungselement.



Abbildung 1: Darstellung der verschiedenen Untersuchungsbereiche im Solarpark

Bei den Untersuchungen im Bereich der **Fernerkundung** bestand die **Herausforderung**, dass konventionelle Methoden wie **Satelliten oder Drohnenaufnahmen nicht die Bereiche unter den Modulen** erfassen konnten. In der Folge testeten die Forschenden eine **neue und innovative Methode**, um Biomassedaten zu erheben. Sie nutzten hierfür ein **3D-Laserscanner-Gerät (SLAM LiDAR)**, welches per Hand durch die Modulreihen getragen wird und durch 360 Grad-Rotation die **gesamte Umgebung als Punktwolke** erfasst – sogar **die Bereiche unter den Modulen**. Die Ergebnisse der LiDAR-Aufnahmen wurden mit den Rising Plate Meter und Sward-stick Messungen validiert.

Das **Versuchsdesign für die Fernerkundungs-/GIS-Untersuchungen** hatte folgende Merkmale:

- Einsatz eines **Hovermap SLAM-LiDAR-Scanners im Handbetrieb** auf ca. 0,3 ha; es wurden rund 78 Mio. Punkte in 3D erfasst.
- **Referenzmessungen:**
Es wurden **Rising Plater Meter (RPM)**-Messungen unter und neben den Modulen sowie in offenen Bereichen durchgeführt. Zudem wurde die maximale Pflanzhöhe mit einem **Sward-Stick** (linealartiges Messgerät) entlang von Transekten erfasst (s. Abbildung 2).
- Anschließend wurde die **LiDAR-Punktwolke georeferenziert, bereinigt, normalisiert** (Boden = 0) und die PV-Module aus den Daten entfernt; zudem wurden verschiedene **Höhenmetriken** (u. a. 25., 50., 90. Perzentil) berechnet.

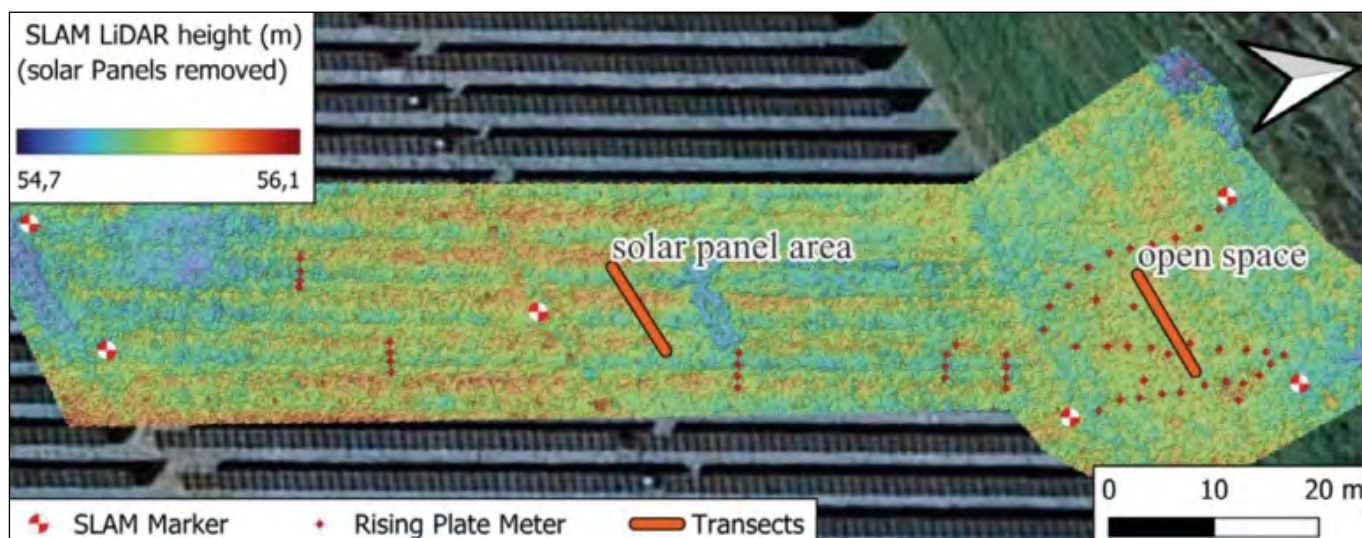


Abbildung 2: Untersuchungsort und Position der Bodenmessungen im Solarpark (Aufnahme durch SLAM LiDAR)

METHODIK DER DATENERHEBUNG

Die Datenerhebung bestand aus unterschiedlichen Herangehensweisen, die die Forschenden anwandten:

METHODIK	BESCHREIBUNG / NUTZEN
Rising Plate Meter (RPM) 	<ul style="list-style-type: none">• Messung komprimierter Bestandshöhe (Compressed sward height) auf Weiden• Indikator für Wachstum, Gesundheit und Managemententscheidungen (z. B. Mähen)• optimale Beweidungs- und Düngungsplanung
Destruktives Sampling 	<ul style="list-style-type: none">• Ernte von Pflanzenproben zur genauen Messung von Biomasse, Ertrag und Artenzusammensetzung• dient als Referenzmethode (im Vergleich zu nicht-destruktiven Tools wie Rising Plate Meter) für Kalibrierung und Validierung
Sensoren für Temperatur & Bodenfeuchte (TOMS-T) 	<ul style="list-style-type: none">• überwachen kontinuierlich Bodentemperatur, Bodenfeuchte, Lufttemperatur oder Mikroklima im Grasland• wichtiger Indikator für Pflanzenwachstum, Bewässerungs-/Beweidungsplanung und Trockenstress-Erkennung• erfassen Einfluss auf Pflanzenwachstum, Nährstoffmobilisierung und Bodenorganismen
Einstrahlungssensoren (PAR) 	<ul style="list-style-type: none">• messen photosynthetisch aktive Strahlung (PAR, 400–700 nm) für Pflanzen• erfassen Lichtverfügbarkeit zur Bewertung von Photosyntheseraten und Produktivität• wichtig für Wachstumsmodellierung, Schattenanalysen und Ertragsprognosen
Thermal-kamera 	<ul style="list-style-type: none">• Erkennung von Trockenstress und Wasserhaushalt durch Messung von Pflanzentemperaturen• Erfassung von Mikroklima, Pflanzengesundheit und Ertragsvariabilität
NIRS-Analyse 	<ul style="list-style-type: none">• Die NIRS-Analyse (Nahinfrarotspektroskopie)• wird zur Untersuchung von z. B. Rohprotein, -faser oder -fett bei landwirtschaftlichen Materialien wie Getreide, Mais, Raps oder Grünland eingesetzt
Bodenproben 	<ul style="list-style-type: none">• zur Analyse von Nährstoffgehalten (P, K, Mg, pH), Bodenfruchtbarkeit und -struktur• Grundlage für Düngestrategien, Kalkung und Ertragsoptimierung

METHODIK

BESCHREIBUNG / NUTZEN

Pflanzenarten



- Pflanzenarten-Analyse bewertet Biodiversität, Futterqualität und ökologische Stabilität
- bestimmt botanische Zusammensetzung für Management, Ertragsoptimierung und Naturschutz
- zeigt Einfluss von Nutzung, Nährstoffen und Klima auf Bestandsentwicklung

UAV LiDAR



- Drohne, die mit einem LiDAR-Sensor ausgestattet ist, der mittels Laserimpulsen Entfernungen misst und daraus hochauflösende 3D-Modelle von Gelände und Vegetation erzeugt
- Einsatz im Solarpark Klein Rheide

Handheld LiDAR



- tragbarer Scanner (handgehalten), der Laserimpulse aussendet, Reflexionen misst und präzise 3D-Punktwolken erzeugt
- erfasst Gelände, Vegetation oder Gebäude mobil für Kartierung, Volumenberechnungen und 3D-Modelle in schwer zugänglichen Arealen
- Einsatz in allen untersuchten Solarparks

Feldspektrometer



- misst Reflexionsspektren von Pflanzen/Böden im Feld
- schätzt Biomasse, Chlorophyll, Nährstoffe (N, P), Stress & Futterqualität nicht-destruktiv
- Einsatz am Versuchsstandort Dwergte



EXKURS: LASERSCANNING MIT "LiDAR" 3D SCANNING

WAS IST LiDAR?



Zu den im Untersuchungsdesign angewendeten innovativen Methoden zählt die Vermessung mittels **LiDAR** (Light Detection and Ranging). Dabei sendet ein LiDAR-Sensor Laserimpulse aus, die auf Objekte treffen und zum Sensor reflektiert werden. Durch die Messung der Zeit, die das Licht für die Hin- und Rückreise benötigt, wird die Entfernung zu den Objekten berechnet. So erfasst der Sensor Millionen von Datenpunkten in kurzer Zeit und erstellt eine präzise Darstellung der Umgebung – die sogenannte **Punktwolke**.

WIE VERWENDET MAN LiDAR?



LiDAR kann auf verschiedene Arten verwendet werden. **Terrestrisch** wird es von festen Standorten aus eingesetzt, um die Umgebung von einem Punkt aus zu scannen. **Mobil** kann es handgetragen, auf Fahrzeugen, Drohnen oder Flugzeugen montiert werden, um größere Flächen effizient zu erfassen und detaillierte 3D-Modelle zu erstellen.

WO LIEGT DER VORTEIL DIESER METHODE?



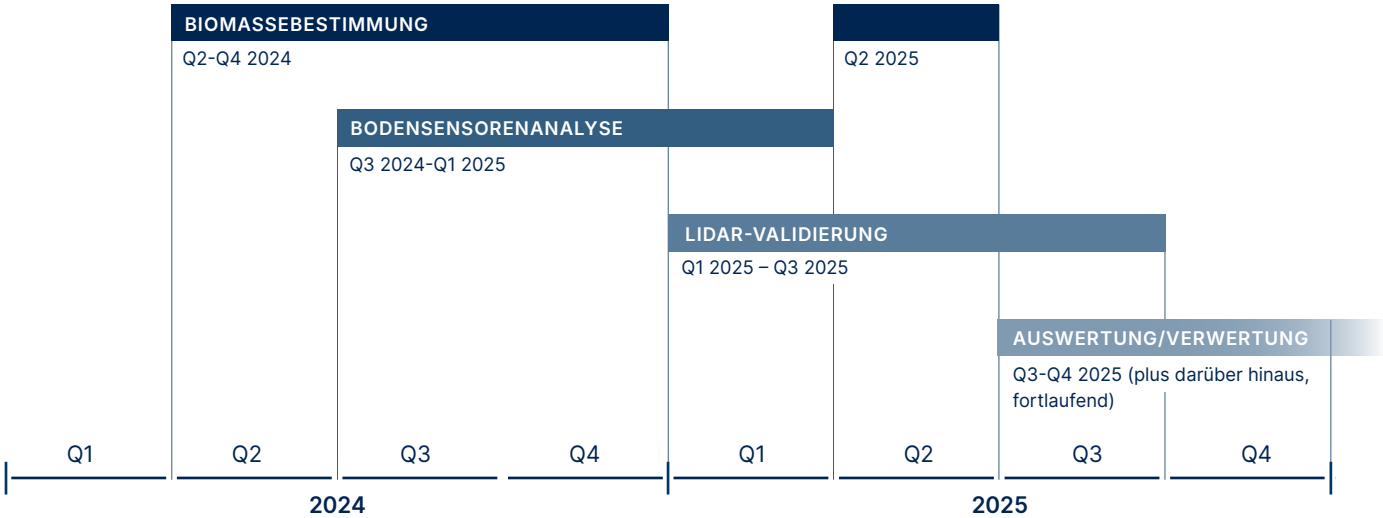
Der Vorteil der LiDAR-Methode liegt in ihrer hohen Genauigkeit, der schnellen Erfassung **großer Flächen** sowie ihrer **Unabhängigkeit von Lichtverhältnissen**. Sie kann auch durch Vegetation scannen und so Bereiche erfassen, die mit anderen Methoden verborgen bleiben. Ein weiterer Vorteil ist, dass LiDAR bei der richtigen Positionierung auch schwer zugängliche Stellen, wie die Bereiche **unter Solarpanelen**, abdecken kann.

Anwendung von LiDAR
in den Solarparks Klein
Rheide und Dwertge





ZEITPLAN DES PROJEKTS



STAND DER FORSCHUNG UND ERGEBNISSE

Die Auswertung der erhobenen Daten und Probennahmen ist derzeit noch nicht abgeschlossen, d. h. die Ergebnisse sind noch nicht vollständig vorhanden (s. auch „Vorschau auf künftige Publikationen“ S.22). Dennoch liegen bereits einige Auswertungen vor, die nachfolgend dargestellt werden.

Bodenwerte

In den Solarparks Klein Rheide, Lottorf und Dwertge wurden unter anderem **Boden- und Mikroklimawerte** untersucht. Hier wurde sich auf den **Gesamtstickstoff (N)**, den **Gesamtkohlenstoff (C)** und **Bodenfeuchte** konzentriert. Es wurden jeweils die bekannten Zonen (Gap, Halfshade, Shade, Edge) in drei verschiedenen Arealen beprobt: In der **Freifläche** (Referenzfläche, „Open“), **unter den Modulen** („Module“) und in den Flächen, bei denen Module in der Reihe weggelassen wurden („Window“). Die **Bodenwerte** wurden in **achtmaler Wiederholung** erhoben, die **Bodenfeuchtemessungen** jeweils einmal im **Sommer** und einmal im **Herbst** durchgeführt. Die statistische Auswertung aus Lottorf (s. Tabelle 1) ergibt folgendes Bild:

- Im Bereich unter den Modulen zeigt sich, dass die **Flächen im Schatten** und **teilweise im Halbschatten im Herbst** eine deutlich **höhere Bodenfeuchte** aufweisen als die entsprechenden Positionen in der offenen Referenzfläche.
- Die **Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte** im Boden sind im **Modulbereich** in allen Positionen **geringer als in der Freifläche**.
- Unter den Modulen gibt es pro Position unterschiedliche Nährstoffwerte, während in der Freifläche keine Variation zu verzeichnen ist. Dies deutet auf eine **höhere Heterogenität der Standorte unter den Modulen** hin.

Geschätzte Mittelwerte \pm SE (Standardfehler) aus verallgemeinerten linearen gemischten Effektmodellen für Bodenfeuchte, Stickstoff (N) und Kohlenstoff (C). Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede innerhalb der Gebiete, hellgrau kennzeichnet niedrigere Werte, während dunkelgrau höhere Werte im Vergleich zum Gebiet „Open“ an den jeweiligen Positionen kennzeichnet. (Quelle: Hamidi, D. et al. (2026). Sun, shade, and soil: A case study on how free-field photovoltaic systems alter microclimate & soil. Accepted paper for EGF conference Evora 2026)

Area	Position	N [g kg ⁻¹ DM]	C [g kg ⁻¹ DM]	Bodenfeuchte [m ³ m ⁻³]	
				(Sommer)	(Herbst)
Open	Gap	1.46 \pm 0.03 ^a	22.2 \pm 0.5 ^a	0.24 \pm 0.01 ^a	0.27 \pm 0.008 ^a
	Halfshade	1.47 \pm 0.03 ^a	22.4 \pm 0.5 ^a	0.24 \pm 0.01 ^a	0.26 \pm 0.008 ^a
	Shade	1.45 \pm 0.03 ^a	22.1 \pm 0.5 ^a	0.22 \pm 0.01 ^a	0.26 \pm 0.008 ^a
	Edge	1.49 \pm 0.03 ^a	22.4 \pm 0.5 ^a	0.23 \pm 0.01 ^a	0.26 \pm 0.008 ^a
Module	Gap	1.29 \pm 0.03 ^b	20.1 \pm 0.5 ^b	0.23 \pm 0.01 ^{ab}	0.27 \pm 0.008 ^b
	Halfshade	1.23 \pm 0.03 ^b	18.7 \pm 0.5 ^b	0.19 \pm 0.01 ^a	0.23 \pm 0.008 ^a
	Shade	1.03 \pm 0.03 ^a	15.4 \pm 0.5 ^a	0.26 \pm 0.01 ^b	0.29 \pm 0.008 ^b
	Edge	1.30 \pm 0.03 ^b	19.9 \pm 0.5 ^b	0.22 \pm 0.01 ^{ab}	0.26 \pm 0.008 ^b
Window	Gap	1.26 \pm 0.03 ^a	20.2 \pm 0.5 ^a	0.22 \pm 0.01 ^a	0.28 \pm 0.008 ^b
	Halfshade	1.27 \pm 0.03 ^a	20.1 \pm 0.5 ^a	0.23 \pm 0.01 ^a	0.26 \pm 0.008 ^{ab}
	Shade	1.26 \pm 0.03 ^a	19.3 \pm 0.5 ^a	0.19 \pm 0.01 ^a	0.24 \pm 0.008 ^a
	Edge	1.40 \pm 0.03 ^a	22.5 \pm 0.5 ^b	0.12 \pm 0.02 ^a	0.25 \pm 0.001 ^{ab}

Tabelle 1:
Bodenwerte
der Untersuchungen
im Solarpark Lottorf

Trockengewicht

In der Graslandwissenschaft nutzt man das **Trockengewicht**, weil **Biomasse** nur **so unabhängig vom stark schwankenden Wassergehalt vergleichbar** ist. Aus dem Wert des Trockengewichts lassen sich **Aussagen zum Ertrag eines Bestandes, zu Nährstoffen und Energie pro Fläche** sowie zur Eignung des Graslands für die **Futterproduktion** treffen.

Erste Auswertungen der Pflanzenproben aus den Solarparks Gottesgabe, Klein Rheide und Lauterbach zeigten, dass die **Variabilität im Bereich der Solarparks höher ist als in der Freifläche** (s. Abbildung 3). Gleichzeitig kommt es auf den **Standort und die Bauweise des Solarparks** an. Der **Solarpark Gottesgabe** ist auf **sandigem Boden** im durch Wärme und Trockenheit geprägten Brandenburg errichtet, wodurch die **Beschattung** durch die Solarmodule zu einer **höheren Biomasseproduktion**

führt. Im hessischen **Solarpark Lauterbach** wiederum gibt es **mehr Niederschlag**, weshalb die Flächen innerhalb des Solarparks ein geringeres Trockengewicht aufweisen als in der Freifläche.

Dies lässt sich folgendermaßen erklären: Wenn es **heiß und trocken** ist, wachsen die Pflanzen wegen der **eingeschränkten Verdunstung** unter den Solarmodulen besser. Wenn dagegen auf der gesamten Fläche **genug Feuchtigkeit** vorhanden ist, können die **Pflanzen von mehr Licht profitieren** und **wachsen unverschattet besser**. Vor dem Hintergrund des voranschreitenden Klimawandels sollte eine stärkere Beschattung aber durchaus Vorteile bringen. Außerdem kommt es beim Trockengewicht auch auf die Arten an, die getrocknet werden. Krautige Pflanzen (z. B. Brennnesseln) wiegen deutlich weniger als Gräser.

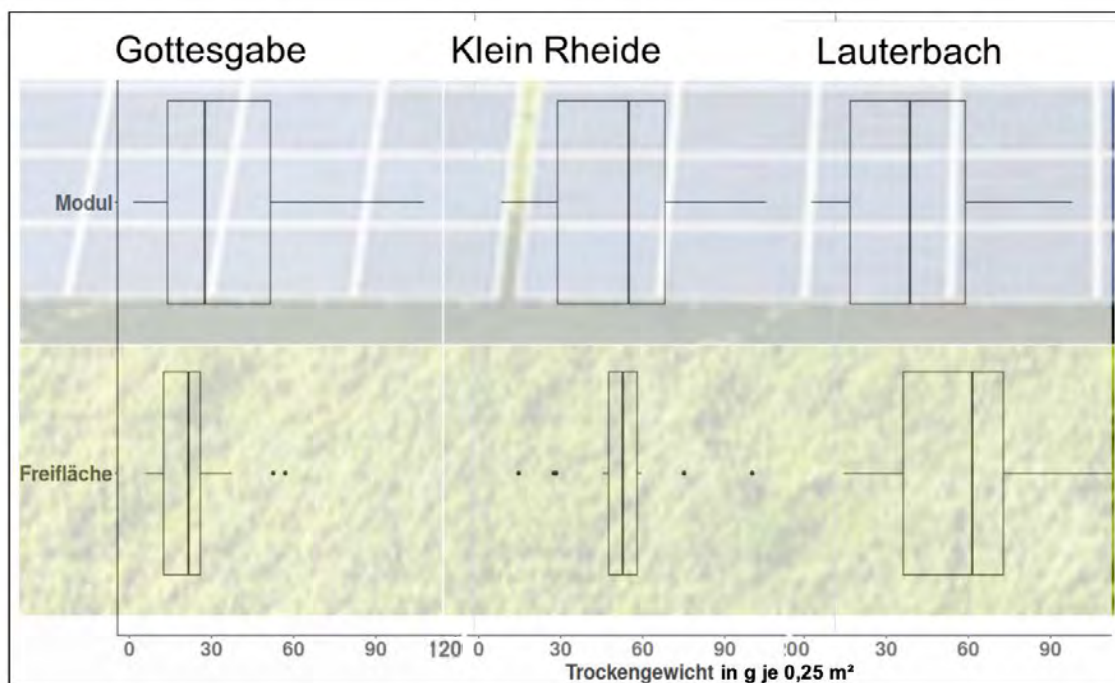


Abbildung 3: Analyse des Trockengewichts der Proben in den Solarparks Gottesgabe, Klein Rheide und Lauterbach

Bei der **Trockengewichtsanalyse pro Position** (s. Methodik) wurde deutlich, dass **zwischen den Modulreihen (gap) die meiste Biomasse** wächst, während **unter den Modulen (edge und shade) weniger oder genauso viel wie in der Freifläche** wächst (s. Abbildung 4). Auch hier ist die durch die Module hervorgerufene **Heterogenität der Solarparks** sehr gut sichtbar.

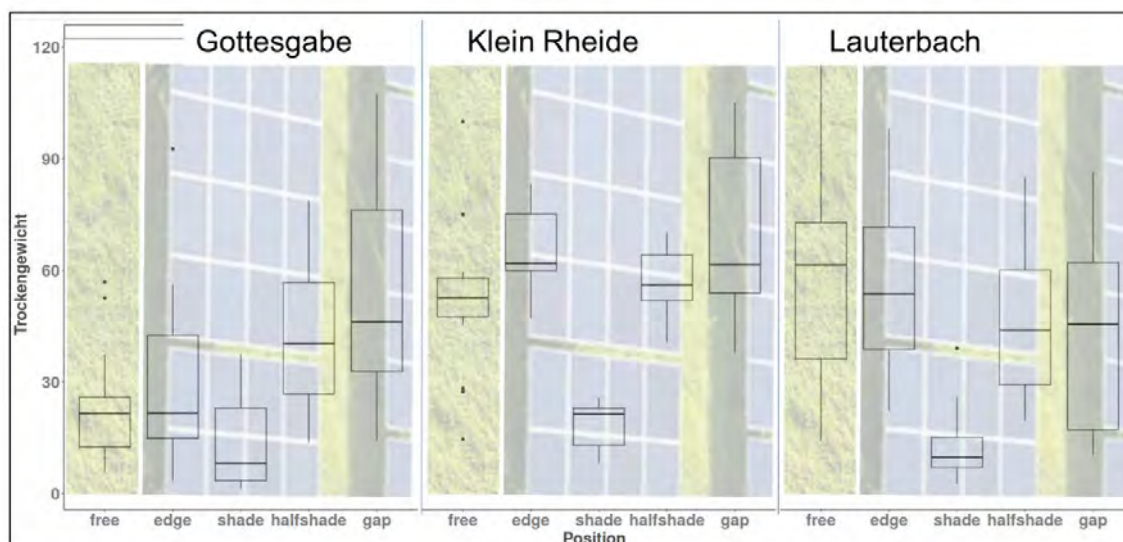


Abbildung 4: Trockengewichtsanalyse für die verschiedenen Positionen

Pflanzenarten

Um die **Vegetationsentwicklung** und die Biodiversität der Flora zu erfassen, wurden in den untersuchten Solarparks **Pflanzenproben entnommen und analysiert**. Hierfür werden die Pflanzenarten im **50*50 cm Rahmen im Feld** mit **mehreren Aufnahmeempunkten** bestimmt und ihre **Anteile an der**

Biomasse im Rahmen geschätzt. Anschließend werden die Pflanzen **geschnitten und gewogen, getrocknet** und **per NIRS³ die Inhaltsstoffe** bestimmt. Für den Solarpark Gottesgabe ergibt sich folgendes Bild hinsichtlich der Pflanzenarten:

³Nahinfrarotspektroskopie, s. Seite 9

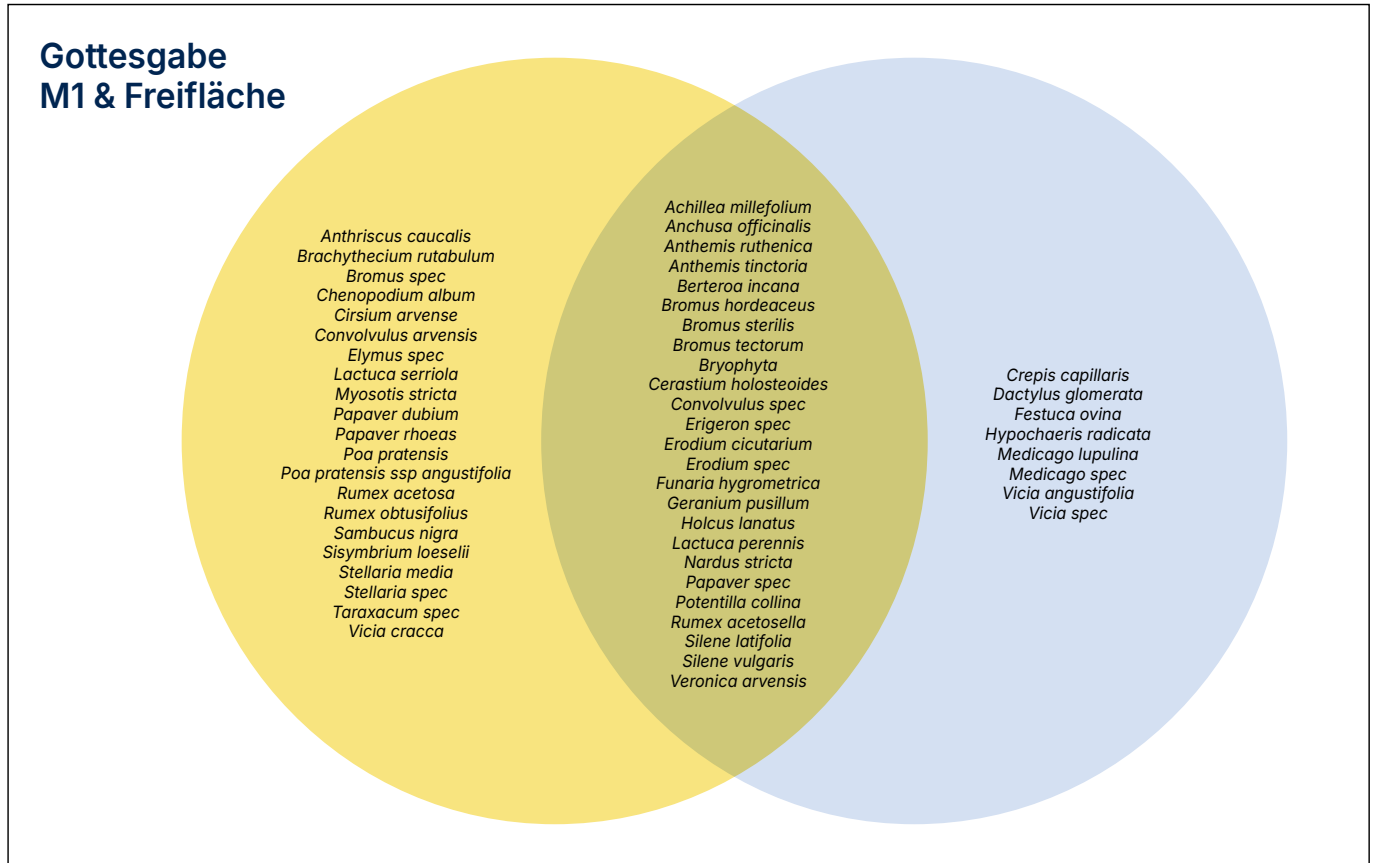


Abbildung 5: Venn-Diagramm mit den Einzel- und Schnittmengen von Modulbereich und Freifläche im Solarpark Gottesgabe

Das Venn-Diagramm in Abbildung 5 zeigt die **Arten im Modulbereich** (gelb), in der **Freifläche** (blau) und die, die **in beiden Positionen** vorkamen (grün) im Solarpark Gottesgabe. Auffällig ist, dass **unter dem Modul eine höhere Vielfalt** als in der Freifläche existiert. In diesem Solarpark wächst nicht nur quantitativ mehr Biomasse, sondern auch das **Pflanzenvorkommen ist artenreicher**.



Pflanzeninhaltsstoffe

Nicht nur die Masse des Aufwuchses ist von Bedeutung, auch **Inhaltsstoffe geben Auskunft** über die **Eignung des Grünlands für bspw. Tierfütterung**. Daher wurde mittels **Nahinfrarotspektroskopie (NIRS)** eine Analyse des **Rohprotein- und Rohzuckergehalts** durchgeführt.

Rohproteingehalt

Für die Solarparks Gottesgabe und Lauterbach liegen **Rohproteinwerte (XP)** für die verschiedenen Positionen vor, s. Abbildung 6. Hierbei wird deutlich, dass der Bereich **unter den Modulen (shade)** **den höchsten Rohproteingehalt** aufweist, während in der **Freifläche (free)** und **zwischen den Modulen (gap)**

der **geringste Proteingehalt** gemessen wurde. Wieviel Eiweiß Biomasse enthält, hängt somit direkt mit den **Standortbedingungen** und der dort auftretenden **Photosyntheserate** zusammen.

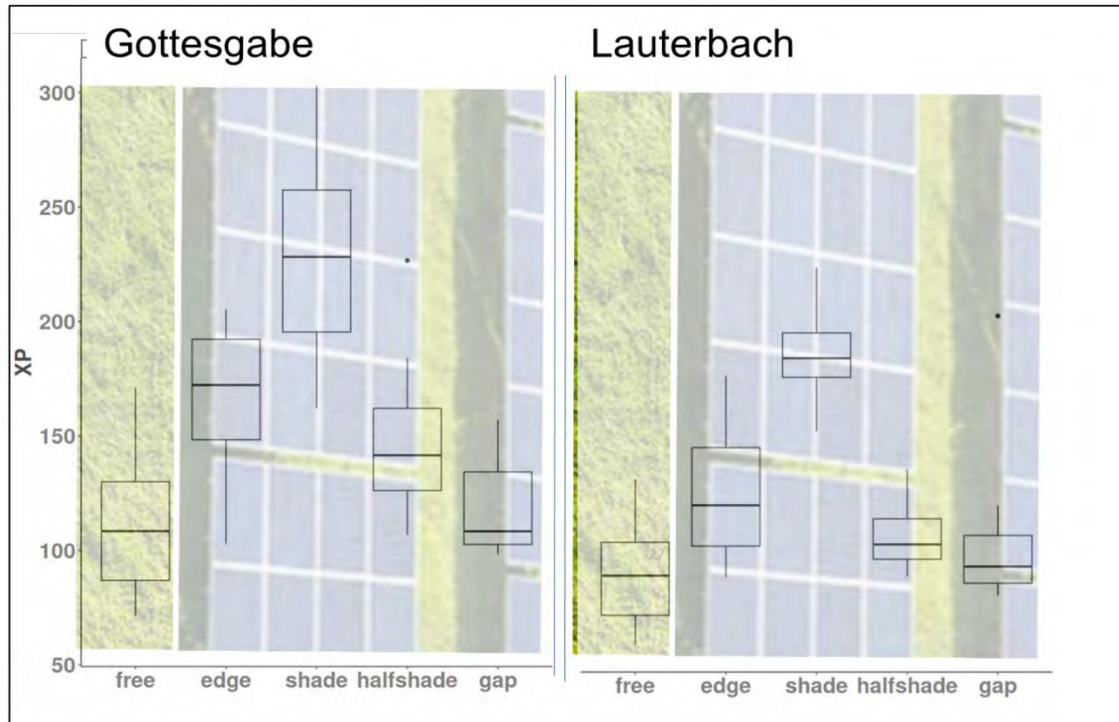


Abbildung 6: Analyse der Rohproteinwerte für die verschiedenen Positionen in den Solarparks Gottesgabe und Lauterbach

Rohzuckergehalt

Vom Solarpark Lottorf liegen Daten zum **Rohzuckergehalt** sowie der **Vergleich zum Rohproteingehalt** auf derselben Fläche vor. Hier wurden jeweils **drei Schnitte** durchgeführt und analysiert. Anhand der Auswertung in Abbildung 7 wird ersichtlich, dass **unter den Modulen höhere Rohpro-**

teingehalte (XP %, links) und niedrigere Rohzuckergehalte (XZ %, rechts) vorkommen. Dies ist damit zu erklären, dass die **Photosynthese unter den Modulen limitiert** ist und **weniger Zucker produziert** wird.

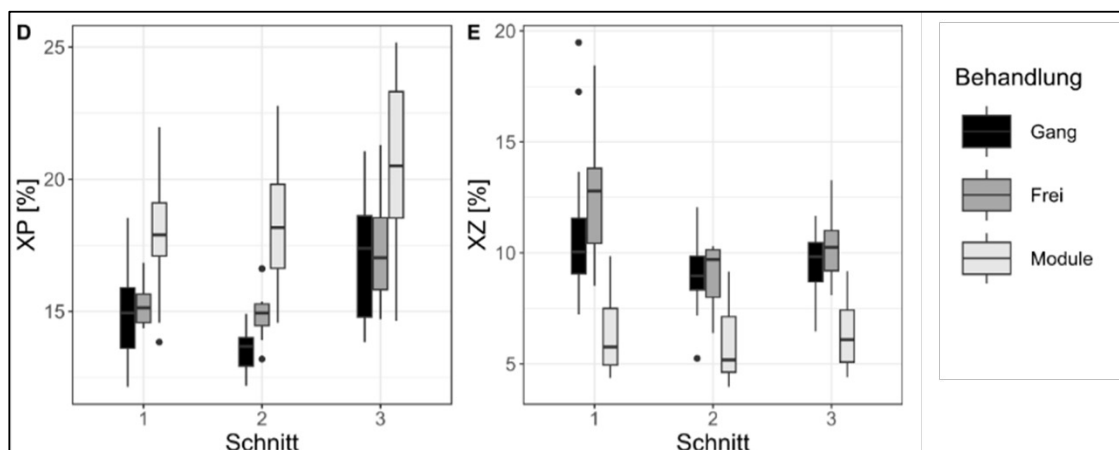


Abbildung 7: Auswertung des Rohprotein- und Rohzuckergehalts für den Solarpark Lottorf



Weidehaltung und Tierwohl

Im Solarpark Lottorf wurden unter anderem **Untersuchungen zum Verhalten von weidenden Schafen** durchgeführt. Es handelte sich um eine **40 × 50 m Teilfläche**, zur Hälfte mit einachsigen nachgeführten PV-Modulen, zur Hälfte ohne PV-Module als Referenzfläche. Die gesamte Fläche wurde zusätzlich in **Gridzellen für die Analysen** unterteilt. Dadurch konnte **sehr kleinräumig** auf die **Unterschiede zwischen den Bereichen** geschaut werden.

Zwei 8 tägige Beweidungsperioden wurden betrachtet:

- **Periode 1 (Juni): 10 bereits Solarpark-erfahrene Schafe** (aber ohne Erfahrung mit nachgeführten Modulen).
- **Periode 2 (September): 10 „naive“ Schafe** ohne vorherige Solarpark-Erfahrung.

Beide Bereiche (mit und ohne PV-Module) waren **frei zugänglich**, das Verhalten wurde **minütlich mit GPS-/Beschleunigungssensor-Halsbändern** aufgezeichnet.



Das Verhalten der Schafe lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Tagesverlauf:

- **Tagsüber** verbrachten die Schafe mit **steigender Lufttemperatur** zunehmend **mehr Zeit im Bereich mit PV-Modulen**; dort war die bodennahe Lufttemperatur stets etwas niedriger als im offenen Bereich.

- **Nachts** hielten sich die Schafe in beiden Perioden überwiegend im Bereich **ohne PV-Module** auf und lagerten dort entlang des Zaunes.

Erfahrungseffekt:

- **Erfahrene Schafe** (Periode 1) nutzten von Beginn an **beide Bereiche** für die aktive Zeit und lagerten tagsüber bevorzugt **unter den PV-Modulen**.
- **Naive Schafe** (Periode 2) **mieden die PV-Reihen an den ersten Tagen** tagsüber zunächst, nutzten dann aber **ab Tag 3 zunehmend auch den PV-Bereich**, erst am Rand, später bis in die Mitte der Modulreihen.

Temperatur-Bezug:

- Mit stündlich **steigender Lufttemperatur** verschob sich die **Aufenthaltszeit deutlich in den PV-Bereich**; auch bei geringen Temperaturdifferenzen war der **PV-Bereich etwas kühler**.

Trittbelastung und Kotablagerung:

- **Unter den PV-Modulen** wurde der Bestand in beiden Perioden **deutlich stärker niedergetreten** als im offenen Bereich, was auf eine intensivere Nutzung dieser Flächen hinweist. In der ersten Periode hinterließen die Schafe signifikant mehr Kot im PV-Bereich ab. In der zweiten Periode lagerten sie dagegen fast dreimal so viel im offenen Bereich, sodass sich die **Nährstoffrückführung räumlich verschiebt** und die **Bestände kleinteilig heterogener** werden.

Futterqualität:

- **Beide Bereiche lieferten ausreichend Masse und Energie für den Erhaltungsbedarf** von Schafen, mit unterschiedlichen Profilen bei Protein und Zucker (s. „Pflanzeninhaltsstoffe“)

Die **Forschungsergebnisse** aus dem Solarpark Lottorf zur **Beweidung** wurden bereits in dem **Fachartikel „Short-term behavioural patterns of sheep under extensive solar grazing management with sun-tracking photovoltaic modules“** (s. Publikationsliste S. 22) veröffentlicht.



Im Bereich der **Fernerkundungsforschung** galt das Interesse auch der **Methodenvalidierung**. Bisher werden SLAM-LiDAR-Geräte nicht für die Biomasseanalyse in Solarparks eingesetzt, daher musste die Methodik zunächst **auf ihre Anwendbarkeit** überprüft werden.

Derzeit liegen die Daten aus den Untersuchungen im Solarpark Klein Rheide (Schleswig-Holstein) vor, die bereits auf einer Fachkonferenz präsentiert wurden. Die **Untersuchungsergebnisse unterstreichen den Nutzen von handgetragenen SLAM-LiDAR-Geräten** für die **Erfassung der 3D-Struktur von Grasflächen** und liefern Erkenntnisse über die

Höhenverteilung der Vegetation sowohl in offenen Räumen als auch in Bereichen unter PV-Modulen. Mit den erhobenen Werten wurde eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt, um die Stärke des Zusammenhangs zu evaluieren.

In offenen Bereichen zeigte das 25. Quantil der aus LiDAR-Daten abgeleiteten Kronenhöhe eine **starke Korrelation mit den RPM-Messungen** ($R^2=0,88$). Während die Übereinstimmung unter den PV-Modulen abnahm, zeigte das 50. Quantil immer noch einen respektablen R^2 -Wert von 0,75, s. Abbildung 8.

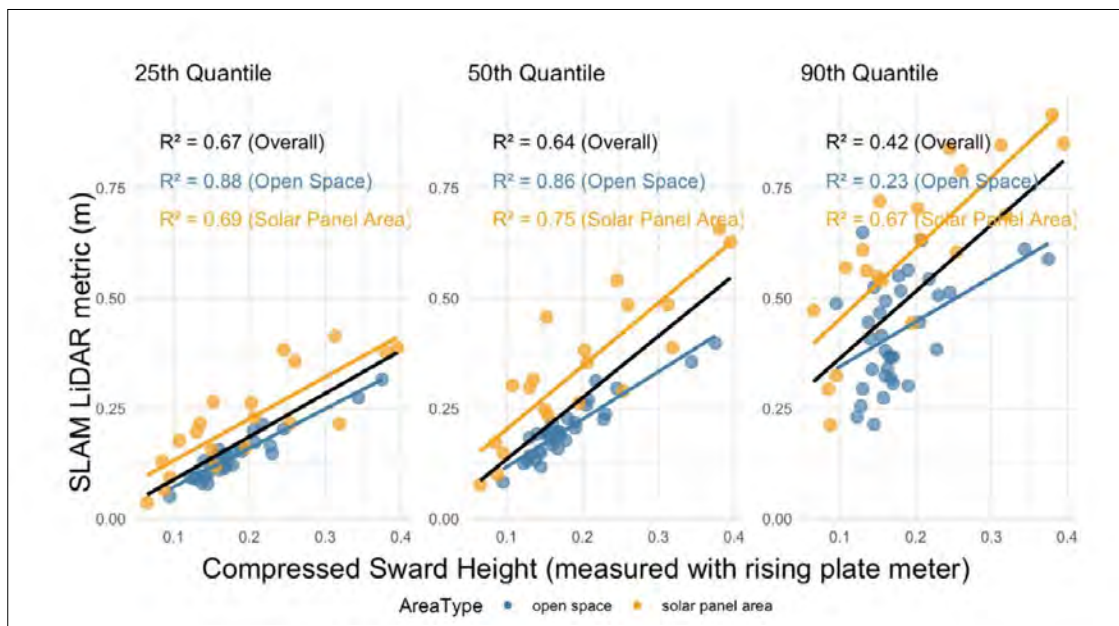


Abbildung 8: Beziehung zwischen der komprimierten Grasnarbenhöhe (gemessen mit einem Rising-Plate-Meter) auf der X-Achse und den SLAM-LiDAR-Metriken am 25., 50. und 90. Quantil auf der Y-Achse. Regressionslinien und R^2 -Werte werden für die Gesamtdaten (schwarz), Freiflächen (blau) und Solarpanelbereiche (orange) angezeigt.

Abbildung 8 zeigt, wie gut die gemessene Grasnarbenhöhe (mit dem RPM-Gerät) mit LiDAR-Daten (an 25., 50. und 90. Quantil) übereinstimmt – getrennt für offene Flächen (blau) und Bereiche unter Solarpaneelen (orange). Der **beobachtete Anstieg der R^2 -Werte** bei der **Unterscheidung zwischen Freiflächen und Flächen unter PV-Modulen** deutet darauf hin, dass die **Verschattung durch die Module** einen **erheblichen Einfluss auf die Morphologie** (äußerer Aufbau und Struktur) und die strukturellen Eigenschaften des Grases hat. Detaillierte Auswertungen lassen sich der **Publikation** „*Estimation of grassland structure as a proxy for biomass under free-field photovoltaic systems using handheld SLAM LiDAR*“ entnehmen. Ähnlich wie in Waldweidesystemen führen die **geringeren Lichtverhältnisse unter den Modulen** dazu, dass das **Gras längere Blätter** mit größerer

Blattfläche bildet, aber **weniger Halme** produziert. Dadurch ändert sich auch die Biomasseverteilung und somit die Beziehung zwischen LiDAR-Höhenmessungen und tatsächlicher Biomasse.

Besonders unter den PV-Modulen hat SLAM-LiDAR klare Vorteile gegenüber anderen Methoden (z. B. multispektraler Bildgebung), weil es auch in schattigen oder schwer zugänglichen Bereichen präzise Daten liefert. So lässt sich besser bewerten, wie die Module das Graswachstum beeinflussen. **Das Verfahren ist daher ein vielversprechendes Werkzeug, um Umweltwirkungen von Solaranlagen genauer zu erfassen** – auch wenn die Ergebnisse noch weiter überprüft werden müssen.

SCHLUSSFOLGERUNGEN

Ökologisches Flächenpotenzial:

- **erhöhte Variabilität der Wachstumsbedingungen** der Grünlandvegetation durch die Module
 - **technische Ausgestaltung** der PV-Anlage **beeinflusst die Vegetation**
- Solarparks schaffen durch unterschiedliche Licht- und Feuchtigkeitsbedingungen **spezifische Lebensräume für Pflanzenarten**, die auf offenen Flächen weniger konkurrenzfähig wären, und **erhöhen** so die **floristische Vielfalt innerhalb der Anlage**.

Ökonomisches Flächenpotenzial:

- **Futterverfügbarkeit und -qualität** ist **gut geeignet für Weidenutzung** mit **Schafen und Rindern**
 - Module fungieren als **Witterungsschutz**
 - Erhöhung der **Ertragssicherheit bei Extremwetter**
- Durch **klimawandelbedingte Veränderungen in der Nutztierhaltung** wird der **Aspekt der Witterungsschutzes** zunehmend an **Bedeutung gewinnen**.

Beweidung:

- PV-Module, Tageszeit und Lufttemperatur prägen kurzfristig die **räumlich-zeitlichen Verhaltensmuster der Schafe** deutlich, insbesondere die Nutzung des Schattens im warmen Tagesverlauf.
- Gleichzeitig liefern beide Bereiche (mit und ohne PV-Module) **ausreichend Masse und Energie für den Erhaltungsbedarf** mit unterschiedlichen Profilen bei Protein und Zucker.
- Solar Grazing mit Schafen funktioniert unter nachgeführten Modulen grundsätzlich gut, verursacht **keine beobachteten Schäden an der Technik oder den Tieren** und wird als **vielversprechende, multifunktionale Landnutzung** eingeschätzt.

Methodik:

- SLAM LiDAR hat ein **großes Potenzial Biomasse unter Solarmodulen flächenhaft** zu erfassen.

Zusammenfassend haben die Untersuchungen das Potenzial von **handgeführten SLAM-LiDAR-Geräten** als **effektives Werkzeug zur Bewertung von Grasnarbenstrukturen in PV-Freiflächenanlagen** aufgezeigt. Dies insbesondere in **schattigen Bereichen**, in denen herkömmliche Methoden nur begrenzt einsetzbar sind. Die signifikanten Unterschiede in den R^2 -Werten zwischen offenen und schattigen Bereichen unterstreichen den Einfluss der durch PV-Module verursachten Verschattung auf die Grasmorphologie. Das zeigt, dass zukünftig weitere Anpassungen der Messansätze erforderlich sind. Kommende Forschungen sollten sich daher auch auf die **Verbesserung der Positionsgenauigkeit in schwierigen Umgebungen** und die **Validierung von SLAM-LiDAR-Methoden durch destruktive Biomasseproben** konzentrieren, um die Korrelation zwischen LiDAR-Metriken und der tatsächlichen Biomasse zu stärken. Darüber hinaus könnte die Erforschung von UAV-basierten LiDAR-Systemen ein wirksames Mittel zur Erfassung hochauflösender räumlicher Daten, einschließlich der Bereiche unter PV-Modulen, darstellen.



NUTZEN FÜR DIE PRAXIS

Die Forschungsergebnisse erweitern qualitativ und quantitativ die **Erkenntnisse zum landwirtschaftlichen Wert des Aufwuchses in Solarparks**. Damit wird ein weiterer Beitrag geleistet, einen **Lösungsraum in der Diskussion zum Verhältnis von Solarparks und der Landwirtschaft** zu finden. Energieproduktion benötigt Flächen für Solarparks, wodurch ein Konflikt mit der Landwirtschaft besteht.

Wenn auf ebendiesen Flächen durch angepasste Bauweisen die **Futtermittelverfügbarkeit und -qualität geeignet für Weidenutzung mit Schafen und Rindern** ist, sollte auch anerkannt werden, dass es sich um eine **landwirtschaftliche Nutzungsform der Fläche** handelt. Da gleichzeitig der ökologische Wert durch eine **höhere Artenvielfalt** auf der Fläche steigt, sollte dieser Wert auch dem flächenbe-

reitstellenden Sektor zugerechnet werden, also der Landwirtschaft. Eine **landwirtschaftliche Einordnung vereinfacht** nicht nur die rechtliche Behandlung der Flächen aus Sicht der Landwirtschaft. Es stärkt auch die **Akzeptanz im Agrarsektor**. Die präzisere rechtliche Einordnung könnte ermöglichen, dass auch auf Flächen klassischer Solarparks eine landwirtschaftliche Nutzung (z. B. als Grünland) mit ökologischen Mehrwerten wie erhöhter Artenvielfalt rechtssicher kombiniert werden kann.

In jedem Fall bekräftigen die vorliegenden Forschungsergebnisse: Solarparks sind vielfältig und bieten Raum für die Mehrfachnutzung von Flächen.





PUBLIKATIONSLISTE

- Zinken L., Hamidi D., Tegtmeyer P., Kayser M., Isselstein J. (2024) **Microclimate, grass growth and herbage quality of peat grassland under free field photovoltaic modules.** Conference: Why grasslands? EGF 2024, 49-51.
- Hamidi D., Sieve F., Siede C., Wilms L., Zinken L., Kunz F., Kayser M., Hamidi M., Isselstein J. (2024) **Solar grazing – spatial distribution of sheep in free-field photovoltaic systems on grassland.** Conference: Why grasslands? EGF 2024, 452-454.
- Hamidi D., Baumann K., Kayser M., von Witzke H., Isselstein J. (2024) **Agromische und ökologische Potenziale von Photovoltaikanlagen auf Grünland.** Berichte über Landwirtschaft, Band 102, Heft 2.
- Hütt C., Isselstein J., Jenal A., Kunz F., Vehlken L., Wolf J., Zinken L., Hamidi D. (2025) **Estimation of grassland structure as a proxy for biomass under free-field photovoltaic systems using handheld SLAM LiDAR.** Precision agriculture 25 (SET TWO VOLUMES), 852-858
- Siede C., Rethmeyer F., Wilms L., Zinken L., Kunz F., Sutterlütli R., Weber L., Hamidi M., Kayser M., Isselstein J., Hamidi D. (2026) **Short-term behavioural patterns of sheep under extensive solar grazing management with sun-tracking photovoltaic modules.** Livestock Science, Volume 303, January 2026.

VORSCHAU KÜNFTIGE PUBLIKATIONEN

(2026/2027)

- Artikel zur EGF-Conference 2026 in Evora/Portugal zum Thema **Mikroklima und Bodenfeuchte** in PV-Freiflächenanlagen
- Artikel zu **Mikroklima im Solarpark** (Dr. Dina Hamidi, Dr. Karen Baumann/Universität Vechta)
- Artikel zur **Validierung der Methodik**, mit LiDAR Biomasse unter Solarmodulen flächenhaft zu erfassen (Dr. Christoph Hütt, Dr. Dina Hamidi)
- Artikel zu den **Detailergebnissen aus den Untersuchungen** der einzelnen Solarparks 2024/2025 (Dr. Dina Hamidi, Dr. Christoph Hütt)



Kontakt:
Bundesverband Neue Energiewirtschaft (bne) e.V.
Hackescher Markt 4, 10178 Berlin
Tel.: +49 30 400 548-0
mail@bne-online.de
www.bne-online.de

