

GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

Uploaddatum: 10.08.2026

Uploadzeit: 23:48

Dies ist ein von FlexNow automatisch beim Upload generiertes Deckblatt. Es dient dazu, die Arbeit automatisiert der Prüfungsakte zuordnen zu können.

**This is a machine generated frontpage added by FlexNow.
Its purpose is to link your upload to your examination file.**

Matrikelnummer: 18613936



Masterarbeit im wissenschaftlichen Studiengang Agrarwissenschaften an der
Georg-August Universität Göttingen, Fakultät für Agrarwissenschaften

Biodiversität, Biomasseproduktion und Futterqualität von extensivem Grünland unter Photovoltaikanlagen

Angefertigt im Department für Graslandwissenschaft

Erstprüferin: Dr. Dina Hamidi

Zweitprüferin: Dr. Karen Baumann

Vorgelegt von: Pauline Richter

Matrikelnummer: 18613936

Schwerpunkt: Ressourcenmanagement

Abgabetermin: 10.08.2026

Zusammenfassung

Der Ausbau der Freiflächen-Photovoltaik gewinnt aufgrund der Energiewende zunehmend an Bedeutung. Gleichzeitig stellt sich die Frage, wie die Flächen unter und zwischen den Photovoltaik-Modulen weiterhin ökologisch und landwirtschaftlich genutzt werden können. Für extensiv bewirtschaftetes Grünland ist bislang nur unzureichend geklärt, wie sich die durch Photovoltaik-Module verursachten kleinräumigen Veränderungen der Standortbedingungen auswirken. Ziel dieser Arbeit war es daher, den Einfluss unterschiedlicher Beschattungspositionen auf die Biodiversität, Biomasseproduktion und Futterqualität des Grünlandaufwuchses zu untersuchen.

Hierzu wurden drei Solarparks in Deutschland jeweils fünf Positionen entlang eines Beschattungsgradienten untersucht. Die Vegetation wurde hinsichtlich ihrer Artenzusammensetzung, ihrer Artenanzahl, des Shannon-Index und der Evenness erfasst. Ergänzend wurden gewichtete Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff berechnet. Die Biomasse wurde anhand der oberirdischen Trockenmasse bestimmt und die Futterqualität anhand der metabolisierbaren Energie sowie der Gehalte an Rohprotein, Rohfaser, ADF und NDF bewertet. Die statistische Auswertung erfolgte unter Berücksichtigung der Position, des Solarparks und ihrer Interaktion.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Vegetation auf die unterschiedlichen Bedingungen innerhalb der Freiflächenphotovoltaik-Anlagen reagiert. Artenzusammensetzung und Diversitätsmaße unterschieden sich zwischen den Positionen, wobei die Ausprägung der Effekte zwischen den Solarparks variierte. Auch die Ellenberg-Zeigerwerte zeigten positionsabhängige Veränderungen, hinsichtlich der Lichtverfügbarkeit sowie teilweise der Feuchte- und Stickstoffverhältnisse. Die oberirdische Biomasse war in allen drei Solarparks in den stark beschatteten Bereichen am geringsten, während die Position mit der höchsten Biomasse zwischen den Anlagen variierte. Hinsichtlich der Futterqualität zeigten sich ebenfalls deutliche Positionseffekte. Unter den Modulen wurden höhere Rohproteingehalte sowie teilweise geringere Gehalte an Rohfaser, ADF und NDF festgestellt, während die metabolisierbare Energie weitgehend unverändert blieb.

Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass Freiflächenphotovoltaik-Anlagen kleinräumig unterschiedliche Standortbedingungen schaffen, deren Auswirkungen auf das Grünland jedoch stark von den jeweiligen Standortbedingungen abhängen. Gleichzeitig zeigen die Ergebnisse, dass Energieerzeugung und extensive Grünlandnutzung grundsätzlich miteinander vereinbar sind. Die gezielte Planung von Freiflächenphotovoltaik-Anlagen auf Flächen mit geringer Ausgangsbiodiversität könnte dabei eine Möglichkeit bieten, den Ausbau erneuerbarer Energien mit einer ökologischen Aufwertung und einer Mehrfachnutzung von Flächen zu verbinden.

Abstract

The expansion of ground-mounted photovoltaic systems is becoming increasingly important as a result of the energy transition. At the same time, the question arises as to how the areas beneath and between the photovoltaic modules can continue to be used for ecological and agricultural purposes. For extensively managed grassland, it has not yet been sufficiently clarified how the small-scale changes in site conditions caused by photovoltaic modules affect the ecosystem. The aim of this study was therefore to investigate the influence of different shading positions on the biodiversity, biomass production and forage quality of grassland vegetation.

To this end, three solar parks in Germany were studied, with five positions each along a shading gradient. The vegetation was assessed in terms of species composition, species richness, the Shannon index and evenness. In addition, weighted Ellenberg index values for light, moisture and nitrogen were calculated. Biomass was determined on the basis of above-ground dry matter, and forage quality was assessed on the basis of metabolisable energy and the contents of crude protein, crude fibre, ADF and NDF. The statistical analysis took into account the position, the solar park and their interaction.

The results show that vegetation responds to the varying conditions within ground-mounted photovoltaic plants. Species composition and diversity indices differed between locations, although the magnitude of these effects varied between the solar parks. The Ellenberg index values also showed location-dependent variations in terms of light availability and, to some extent, moisture and nitrogen conditions. Above-ground biomass was lowest in the heavily shaded areas of all three solar parks, whilst the location with the highest biomass varied between the sites. Significant site-specific effects were also observed with regard to forage quality. Higher crude protein contents and, in some cases, lower levels of crude fibre, ADF and NDF were found beneath the modules, whilst metabolisable energy remained largely unchanged.

Overall, the results illustrate that ground-mounted photovoltaic installations create site-specific conditions on a small scale, although their impact on grassland depends heavily on the specific site conditions. At the same time, the results show that energy generation and extensive grassland use are, in principle, compatible. The targeted planning of ground-mounted photovoltaic systems on land with low baseline biodiversity could offer a way of combining the expansion of renewable energy with ecological enhancement and the multiple use of land.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	i
Abstract	ii
Abkürzungsverzeichnis	v
Abbildungsverzeichnis.....	vi
Tabellenverzeichnis.....	viii
1. Einleitung.....	1
1.1. Klimawandel und Energiewende.....	1
1.2. Freiflächen-Photovoltaikanlagen	1
1.3. Biodiversität	2
1.4. Bedeutung von extensivem Grünland.....	3
1.5. Forschungsstand zu FFPV-Anlagen auf extensivem Grünland	4
1.6. Forschungslücke und Zielsetzung.....	5
2. Material und Methoden	7
2.1. Untersuchungsstandorte.....	7
2.1.1. Solarpark Gottesgabe	7
2.1.2. Solarpark Lauterbach.....	7
2.1.3. Solarpark Klein Rheide.....	8
2.1.4. Meteorologische Bedingungen der Untersuchungsstandorte	8
2.2. Versuchsaufbau.....	10
2.3. Durchführung.....	11
2.4. Statistische Analyse.....	12
3. Ergebnisse.....	15
3.1. Biodiversität	15
3.1.1. Artenzusammensetzung.....	15
3.1.2. Diversitätsmaße	16
3.1.3. Artenspektrum.....	18
3.2. Ellenberg-Zeigerwerte.....	19
3.3. Biomasse	22
3.4. Futterqualität	23
4. Diskussion.....	27
4.1. Biodiversität	27
4.2. Ellenberg-Zeigerwerte.....	29
4.3. Biomasse	33
4.4. Futterqualität	34

5. Limitation.....	37
6. Fazit	38
Literaturverzeichnis	x
Anhang	xvii
Statistische Analyse	xvii
Ergebnisse Biodiversität	xvii
Artenzusammensetzung.....	xvii
Diversitätsmaße	xix
Artenspektrum	xxiv
Ergebnisse Ellenberg-Zeigerwerte.....	xxvii
Ergebnisse Biomasse	xxxi
Ergebnisse Futterqualität.....	xxxiii
Danksagung	xl
Eidesstaatliche Erklärung.....	xli
Erklärung zur Nutzung von ChatGPT und vergleichbaren Werkzeugen im Rahmen von Prüfungen	xli

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ADF	Säure-Detergenzien-Faser
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
EEG	Erneuerbare-Energien-Gesetz
ESOM	Enzymatisch lösliche organische Substanz
FFPV	Freiflächen-Photovoltaik
GG	Gottesgabe
GW	Gigawatt
KR	Klein Rheide
LB	Lauterbach
ME	Metabolisierbare Energie
MW	Megawatt
NDF	Neutral-Detergenzien-Faser
PAR	Photosynthetisch aktive Strahlung
PV	Photovoltaik
TM	Trockenmasse

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Lage der drei Untersuchungsblöcke im Solarpark KR.	11
Abbildung 2: Die Anordnung der Transekte und Positionen innerhalb eines Blocks.	11
Abbildung 3: NMDS-Ordination der Vegetationsaufnahmen auf Basis der Artenzusammensetzung in den drei untersuchten Solarparks. Farben kennzeichnen die Solarparks, Symbole die Positionen. Die Ellipsen umfassen die Gruppierung der Vegetationsaufnahmen innerhalb der Solarparks. Der Stress-Wert der zweidimensionalen Lösung beträgt 0,129.	15
Abbildung 4: Species Richness, Shannon-Index und Evenness der Vegetationsaufnahmen in Abhängigkeit von Position und Solarpark. Dargestellt sind Median, Interquartilsabstand, Spannweite und Ausreißer. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks auf Grundlage der Tukey-Post-hoc-Vergleiche ($p < 0,05$).	18
Abbildung 5: Kumulative Artenanzahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Vegetationsaufnahmen für die fünf Positionen in den Solarparks. Die Zahlen am Ende der Kurven geben die insgesamt erfasste Artenzahl je Position an. Die Kurven basieren auf gemittelten Artenakkumulationskurven aus zufällig permutierten Reihenfolgen der Vegetationsaufnahmen, wodurch der Einfluss der Aufnahmereihenfolge reduziert wurde. ...	18
Abbildung 6: Artenüberschneidungen der fünf Positionen innerhalb der Solarparks.. Die Zahlen geben die Anzahl gemeinsamer bzw. ausschließlich an den jeweiligen Positionen vorkommender Pflanzenarten an.	19
Abbildung 7: Gewichtete Ellenberg-Lichtwerte in den fünf Positionen der drei Solarparks GG , LB und KR . Dargestellt sind die geschätzten Randmittel (Estimated Marginal Means) $\pm$ 95 %-Konfidenzintervalle aus dem linearen gemischten Modell. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks (Tukey-Test, $p < 0,05$).	20
Abbildung 8: Gewichtete Ellenberg-Feuchtwerte in den fünf Positionen der drei Solarparks GG , LB und KR . Dargestellt sind die geschätzten Randmittel (Estimated Marginal Means) $\pm$ 95 %-Konfidenzintervalle aus dem linearen gemischten Modell. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks (Tukey-Test, $p < 0,05$).	21
Abbildung 9: Gewichtete Ellenberg-Stickstoffwerte in den fünf Positionen der drei Solarparks GG , LB und KR . Dargestellt sind die geschätzten Randmittel (Estimated Marginal Means) $\pm$ 95 %-Konfidenzintervalle aus dem linearen gemischten Modell. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks (Tukey-Test, $p < 0,05$).	22
Abbildung 10: TM des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von der Position in den drei untersuchten FFPV-Anlagen. Dargestellt sind Boxplots mit Median, Interquartilsabstand sowie Minimum und Maximum (ohne Ausreißer); Punkte kennzeichnen Ausreißer. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks auf Grundlage eines linearen gemischten Modells mit Tukey-HSD-Post-hoc-Test ($p < 0,05$)...	23
Abbildung 11: Geschätzte Mittelwerte (Estimated Marginal Means, EMMs) der metabolisierbaren Energie des Grünlandaufwuchses an den fünf Positionen in den drei Solarparks. Fehlerbalken stellen die 95 %-Konfidenzintervalle des linearen gemischten Modells dar. Unterschiedliche	

Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks.	24
Abbildung 12: Boxplots der Rohprotein- und Rohfasergehalte des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von Position und Solarpark. Die Boxen zeigen den Median, das 1. und 3. Quartil sowie die Spannweite; Punkte kennzeichnen Ausreißer. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks (Tukey-Test, $p < 0,05$).....	25
Abbildung 13: Boxplots der ADF- und NDF-Gehalte des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von Position und Solarpark. Die Boxen zeigen den Median, das 1. und 3. Quartil sowie die Spannweite; Punkte kennzeichnen Ausreißer. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks (Tukey-Test, $p < 0,05$).....	26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Meteorologische Daten der Wetterstation Müncheberg im Zeitraum Juni 2024 bis Mai 2025.	9
Tabelle 2: Meteorologische Daten der Wetterstation Hoherodskopf im Zeitraum Juli 2024 bis Juni 2025.	9
Tabelle 3: Meteorologische Daten der Wetterstation Schleswig im Zeitraum August 2024 bis Juli 2025.	10
Tabelle 4: Ergebnisse der PERMANOVA zur Untersuchung des Einflusses von Position und Solarpark auf die Artenzusammensetzung aller Vegetationsaufnahmen.....	16
Tabelle 5: Ergebnisse der linearen gemischten Modelle zur Untersuchung des Einflusses der Position, des Solarparks sowie ihrer Interaktion auf Species Richness, Shannon-Index und Evenness..	17
Tabelle 6: Ergebnisse des linearen gemischten Modells (Typ-III-Varianzanalyse) zur Untersuchung des Einflusses der Position, des Solarparks sowie ihrer Interaktion auf die TM des Grünlandaufwuchses.....	22
Tabelle A7: Von der Berechnung der Ellenberg-Zeigerwerte ausgeschlossene Pflanzen und Gründe für den Ausschluss.....	xvii
Tabelle A8: Ergebnisse der PERMANOVA zur Untersuchung der Artenzusammensetzung aller Vegetationsaufnahmen in Abhängigkeit von Position und Solarpark.	xvii
Tabelle A9: Ergebnisse der PERMANOVA zur Untersuchung der Artenzusammensetzung zwischen den Positionen innerhalb der drei Solarparks.	xvii
Tabelle A10: Ergebnisse der paarweisen PERMANOVA-Vergleiche der Artenzusammensetzung zwischen den Positionen innerhalb der drei Solarparks. Angegeben sind die Teststatistik, das Bestimmtheitsmaß, der p-Wert sowie der nach Bonferroni korrigierte p-Wert.	xviii
Tabelle A11: Ergebnisse der Betadisper-Analyse zur Prüfung der Homogenität der multivariaten Streuung innerhalb der drei Solarparks.....	xix
Tabelle A12: Geschätzte marginale Mittelwerte (Estimated Marginal Means, EMMs) einschließlich Standardfehlern, Freiheitsgraden und 95 %-Konfidenzintervallen für Species Richness, Shannon-Index und Evenness.....	xix
Tabelle A13: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche der geschätzten marginalen Mittelwerte (Tukey-Post-hoc-Test) für Species Richness, Shannon-Index und Evenness.....	xx
Tabelle A14: Gruppierung der Positionen auf Grundlage der Tukey-Post-hoc-Tests (Compact Letter Display, CLD) für Species Richness, Shannon-Index und Evenness.....	xxii
Tabelle A15: Kombinationen der Positionen mit den zugehörigen Pflanzenarten im jeweiligen Solarpark.	xxiv
Tabelle A16: Ergebnisse der linearen gemischten Modelle für die Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff.....	xxvii
Tabelle A17: Geschätzte Randmittelwerte (Estimated Marginal Means, EMMs) der Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff nach Position und Park. Angegeben sind der geschätzte Randmittelwert, der Standardfehler, die Freiheitsgrade, das 95 %-Konfidenzintervall sowie die Signifikanzgruppen des Tukey-Post-hoc-Tests.	xxvii

Tabelle A18: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche (Tukey-Post-hoc-Test) der Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff zwischen den Positionen innerhalb der Parks. Angegeben sind die mittlere Differenz der geschätzten Randmittelwerte, der Standardfehler, die Freiheitsgrade, der t-Wert sowie der Tukey-adjustierte p-Wert.	xxviii
Tabelle A19: Deskriptive Statistik der TM des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von Position und Solarpark.....	xxx
Tabelle A20: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche der TM zwischen den Positionen innerhalb der einzelnen Solarparks (Tukey-HSD-Post-hoc-Test auf Grundlage des linearen gemischten Modells).....	xxx
Tabelle A21: Geschätzte Randmittel (Estimated Marginal Means, EMMs) der TM des Grünlandaufwuchses einschließlich Standardfehler, 95 %-Konfidenzintervall und Signifikanzgruppen für die einzelnen Positionen innerhalb der drei Solarparks.....	xxxii
Tabelle A22: Ergebnisse des linearen gemischten Modells (Typ-III-Wald- χ^2 -Test) zur ME des Grünlandaufwuchses.....	xxxiii
Tabelle A23: Geschätzte Mittelwerte (Estimated Marginal Means, EMMs) der ME für die fünf Positionen in den drei Solarparks einschließlich Standardfehler und 95 %-Konfidenzintervalle.	xxxiii
Tabelle A24: Paarweise Tukey-Vergleiche der geschätzten Mittelwerte der ME zwischen den Solarparks.	xxxiii
Tabelle A25: Ergebnisse der Typ-III-Varianzanalyse der linearen gemischten Modelle zur Untersuchung des Einflusses von Position, Solarpark und ihrer Interaktion auf die Futterqualitätsparameter des Grünlandaufwuchses. Angegeben sind die F-Werte und zugehörigen p-Werte.....	xxxiv
Tabelle A26: Geschätzte marginale Mittelwerte (Estimated Marginal Means, EMMs) der Futterqualitätsparameter des Grünlandaufwuchses getrennt nach Position und Solarpark. Angegeben sind Mittelwert, Standardfehler, 95 %-Konfidenzintervall sowie die Signifikanzgruppen des Tukey-Tests.....	xxxiv
Tabelle A27: Ergebnisse der Tukey-Post-hoc-Tests für die Futterqualitätsparameter des Grünlandaufwuchses innerhalb der einzelnen Solarparks. Angegeben sind die paarweisen Mittelwertsdifferenzen, Standardfehler, Teststatistik und p-Werte.	xxxvi

1. Einleitung

1.1. Klimawandel und Energiewende

Der Klimawandel zählt zu den größten globalen Herausforderungen und beeinflusst bereits heute Ökosysteme sowie die landwirtschaftliche Produktion (Lee et al. 2023; Muluneh 2021). Die globale Mitteltemperatur lag im Zeitraum 2011–2020 etwa 1,1 °C über dem vorindustriellen Niveau (Lee et al. 2023). Vom Menschen freigesetzte Treibhausgase sind die Hauptursache der globalen Erwärmung (Lee et al. 2023). Der Klimawandel beeinflusst die landwirtschaftliche Produktion durch steigende Temperaturen, veränderte Niederschlagsmuster und eine Zunahme von Extremwetterereignissen. Dadurch werden Wachstumszyklen von Kulturpflanzen verändert, Bodenfruchtbarkeit und Wasserverfügbarkeit beeinträchtigt sowie Erträge und Erntequalität verringert (Yuan et al. 2024). Neben der Landwirtschaft sind auch Ökosysteme vom Klimawandel betroffen, da klimabedingte Veränderungen die Biodiversität, ökologische Wechselwirkungen und die Funktionsfähigkeit von Ökosystemen beeinflussen (Wang et al. 2024).

Um die Treibhausgasemissionen zu senken, muss der Anteil erneuerbarer Energien weiter steigen. Neben der Windenergie gehört die Photovoltaik (PV) zu den wichtigsten Technologien für eine klimafreundliche Stromerzeugung (Wirth 2026), da sie während des Betriebs nur geringe Treibhausgasemissionen verursacht (Umweltbundesamt 2024). Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) verfolgt das Ziel, die Stromversorgung langfristig vollständig auf erneuerbare Energien umzustellen. Dazu soll die installierte PV-Leistung in Deutschland bis zum Jahr 2030 auf 215 Gigawatt (GW) und bis zum Jahr 2040 auf 400 GW ausgebaut werden, um einen wesentlichen Beitrag zum Klima- und Umweltschutz zu leisten (EEG 2023).

Mit dem Ausbau der Freiflächen-Photovoltaik (FFPV) steigt zugleich der Bedarf an geeigneten Standorten. Es entsteht ein Nutzungskonflikt zwischen der Erzeugung erneuerbarer Energie und anderen Flächennutzungen, insbesondere der landwirtschaftlichen Produktion und dem Naturschutz. (Böhm und Witte 2025; Curioni et al. 2025).

1.2. Freiflächen-Photovoltaikanlagen

PV-Module wandeln die Energie der Sonneneinstrahlung mithilfe von Solarzellen direkt in elektrische Energie um. Dabei entsteht zunächst elektrischer Gleichstrom, der anschließend durch Wechselrichter in netzfähigen Wechselstrom umgewandelt wird. Mehrere Module können zu größeren Anlagen zusammengeschaltet werden (Ahmed et al. 2025; Al-Ezzi und Ansari 2022). FFPV-Anlagen sind ein

wichtiger Bestandteil des Ausbaus erneuerbarer Energien. Im Gegensatz zu Dachanlagen werden sie auf unbebauten Flächen errichtet und ermöglichen aufgrund ihrer Größe eine kostengünstige und effiziente Stromerzeugung im Megawattmaßstab (BMWK 2023; Umweltbundesamt 2026). Mit dem zunehmenden Ausbau der PV wächst daher auch die Bedeutung von FFPV-Anlagen für die Energieversorgung (Dünzen et al. 2024). Ende 2025 waren in Deutschland PV-Anlagen mit einer installierten Leistung von 120 GW in Betrieb. Davon entfielen knapp 40 GW auf FFPV-Anlagen, die eine Fläche von rund 52.000 ha beanspruchten (Umweltbundesamt 2026). In Deutschland werden FFPV-Anlagen überwiegend auf Konversionsflächen, Ackerland oder in Industrie- und Gewerbegebieten errichtet (Dünzen et al. 2024). Circa 55 % der FFPV-Anlagen sind auf landwirtschaftlichen Flächen gebaut (Umweltbundesamt 2026). Dadurch rückt die Frage in den Fokus, wie sich die Stromerzeugung mit einer nachhaltigen Nutzung dieser Flächen vereinbaren lässt (Scognamiglio 2016). Nach Angaben des Umweltbundesamtes könnte die von FFPV-Anlagen beanspruchte Fläche bis 2030 auf etwa 96.000–109.000 ha und bis 2040 auf 150.000–195.000 ha ansteigen (Umweltbundesamt 2026). Selbst dann würden FFPV-Anlagen weniger als 0,5 % der Bundesfläche beanspruchen, ihre räumliche Konzentration auf landwirtschaftlich genutzte Flächen führt jedoch zunehmend zu Nutzungskonflikten zwischen Energieerzeugung, Landwirtschaft und Naturschutz (Umweltbundesamt 2026).

Während der Produktion und beim späteren Recycling entstehen die größten Umweltbelastungen einer PV-Anlage. Mit zunehmender Betriebsdauer einer PV-Anlage verteilen sich die bei Herstellung, Transport und Installation entstehenden Umweltbelastungen auf eine größere Strommenge, wodurch die Umweltwirkungen pro erzeugter Kilowattstunde sinken. Die Lebensdauer von PV-Modulen beträgt in der Regel 25 bis 30 Jahre (Umweltbundesamt 2024).

FFPV-Anlagen greifen durch ihre bauliche Ausgestaltung in die Flächennutzung und das Landschaftsbild ein und können Auswirkungen auf die Umwelt haben (Rosenthal et al. 2024). Sowohl die Errichtung als auch der Betrieb der Anlagen sind mit Veränderungen der Umwelt verbunden, deren kumulative Effekte bei einer zunehmenden Anzahl von Anlagen regional an Bedeutung gewinnen können. Diese Auswirkungen werden im Rahmen der Umweltprüfung im Zuge der Aufstellung des jeweiligen Bebauungsplans bewertet und berücksichtigt (Günnewig et al. 2022).

1.3. Biodiversität

Biodiversität bezeichnet die biologische Vielfalt auf den Ebenen der Gene, Arten und Ökosysteme, die eng miteinander verknüpft sind und sich gegenseitig beeinflussen, gemäß der Convention on Biological Diversity (Härdtle 2024). Die genetische Diversität beschreibt die Variabilität innerhalb einer Art und bildet die Grundlage für deren Anpassungsfähigkeit an sich verändernde Umweltbedingungen. Die

Artendiversität umfasst die Zusammensetzung und Vielfalt der in einem Gebiet vorkommenden Arten, während die Ökosystemdiversität die Verschiedenheit von Lebensräumen sowie der darin ablaufenden ökologischen Prozesse beschreibt (Härdtle 2024). Als zentrale Grundlage funktionierender Ökosysteme trägt Biodiversität wesentlich zur Bereitstellung zahlreicher Ökosystemleistungen bei. Hierzu zählen unter anderem die Regulation des Klimas sowie der Wasser- und Nährstoffkreisläufe, die Bereitstellung von Nahrungsmitteln, Arzneimitteln und Rohstoffen sowie die Erhöhung der Widerstandsfähigkeit von Ökosystemen gegenüber Störungen wie Krankheiten oder den Folgen des Klimawandels (Cardinale et al. 2012; Wittig und Niekisch 2014). Trotz ihrer fundamentalen Bedeutung für das menschliche Wohlergehen wird der Wert der biologischen Vielfalt in der Gesellschaft häufig nur unzureichend wahrgenommen (Mayer 2003). Weltweit sind schätzungsweise 1 Million Tier- und Pflanzenarten vom Aussterben bedroht (IPBES 2019).

Zur Beschreibung der Biodiversität können unter anderem die Diversitätsmaße Species Richness, Shannon-Index und Evenness verwendet. Die Species Richness beschreibt die absolute Anzahl der in einer Lebensgemeinschaft vorkommenden Arten. Der Shannon-Index stellt ein zentrales Maß zur Bewertung der Biodiversität dar, da er sowohl die Artenzahl als auch deren relative Häufigkeit berücksichtigt. Dadurch fließen neben dominanten auch seltenere Arten in die Bewertung ein. Der Index steigt mit zunehmender Artenzahl sowie mit einer gleichmäßigeren Verteilung der Individuen auf die einzelnen Arten. Die Evenness beschreibt die Gleichverteilung von Arten in einer Lebensgemeinschaft. Sie ermöglicht den Vergleich von Gemeinschaften mit unterschiedlicher Artenvielfalt. Der Wert reicht von 0, wenn eine Art dominant ist, bis 1, wenn alle Arten gleich häufig vorkommen (Härdtle 2024).

1.4. Bedeutung von extensivem Grünland

Extensiv bewirtschaftetes Grünland zählt zu den artenreichsten Lebensräumen Mitteleuropas (Heinz et al. 2016). Kennzeichnend sind eine geringe Nutzungsintensität mit reduziertem Düngeeinsatz sowie eine extensive Mahd oder Beweidung (Tiainen et al. 2020). Diese Bewirtschaftungsweise fördert im Vergleich zu intensiv genutztem Grünland eine höhere Biodiversität, da geringere Störungen, eine größere Heterogenität der Lebensräume und eine reduzierte Stickstoffverfügbarkeit die Ansiedlung zahlreicher Pflanzen- und Tierarten begünstigen (Isselstein et al. 2005; Plantureux et al. 2005). Darüber hinaus erbringt extensives Grünland vielfältige Ökosystemleistungen, darunter die Bereitstellung von Futter, den Schutz des Bodens sowie die Regulierung des Wasserhaushalts (Klaus et al. 2025; Meyer et al. 2025). Grünland trägt zudem wesentlich zur Kohlenstoffspeicherung bei, da etwa 20 % des globalen organischen Bodenkohlenstoffs in Grünlandböden gespeichert sind, vor allem in den oberen Bodenschichten (Dondini et al. 2023).

Neben seiner hohen ökologischen Bedeutung besitzt extensiv bewirtschaftetes Grünland auch einen landwirtschaftlichen Wert. Die Artenzusammensetzung eines Grünlandbestandes bestimmt maßgeblich dessen Biomasseertrag und Futterqualität. Insbesondere das Verhältnis von Gräsern, Leguminosen und Kräutern beeinflusst sowohl den Ertrag als auch den Gehalt an Inhaltsstoffen wie Rohprotein, Energie und Mineralstoffen (Hopkins und Holz 2006; Klaus et al. 2025; Melts et al. 2014). Leguminosen erhöhen aufgrund ihrer Fähigkeit zur biologischen Stickstofffixierung den Rohproteingehalt des Futters (Elsässer et al. 2013). Kräuter können die Mineralstoffversorgung ergänzen und die Futterqualität verbessern (Pirhofer-Walzl et al. 2011). Die Zusammensetzung des Pflanzenbestandes wird dabei sowohl von den Standortbedingungen als auch von der Bewirtschaftung beeinflusst und bestimmt damit wesentlich die Produktivität von Grünland (Hassan und Wang 2024; Su et al. 2022).

1.5. Forschungsstand zu FFPV-Anlagen auf extensivem Grünland

Mit dem zunehmenden Ausbau von FFPV-Anlagen wächst auch das wissenschaftliche Interesse an ihren ökologischen Auswirkungen. In den vergangenen Jahren wurden Studien zu Biodiversität, Vegetationsentwicklung und verschiedenen Artengruppen veröffentlicht. Übersichtsarbeiten zeigen jedoch, dass sich die Untersuchungen hinsichtlich der Standorte und des Klimas, der technischen Ausgestaltung der FFPV-Anlagen sowie der Flächenbewirtschaftung deutlich unterscheiden. Dadurch sind die Ergebnisse nur eingeschränkt vergleichbar und lassen sich nur bedingt auf andere Anlagen übertragen (Gómez-Catasús et al. 2024; Schlegel 2021; Treasure et al. 2025).

Ein zentrales Ergebnis der bisherigen Forschung ist, dass PV-Module eine Heterogenität innerhalb einer FFPV-Anlage schaffen. Durch die Beschattung entstehen Unterschiede in der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) sowie im Temperatur- und Feuchtehaushalt zwischen Bereichen unter den Modulen und den Modulzwischenräumen. Diese veränderten Standortbedingungen beeinflussen die Vegetationsentwicklung und können zu Unterschieden in der Artenzusammensetzung und Biomasseproduktion führen (Armstrong et al. 2016; Armstrong et al. 2026; Sturchio et al. 2022).

Wie sich eine FFPV-Anlage auf die Biodiversität des Grünlands auswirkt, hängt von einer Vielzahl an Faktoren ab. Entscheidend sind sowohl die Eigenschaften des Standorts und dessen Ausgangszustand als auch die Eingriffe während der Errichtung der Anlage. Ebenso beeinflussen die bauliche Gestaltung der Anlage und die Art der anschließenden Flächenbewirtschaftung die Entwicklung der Vegetation und der daran gebundenen Artengemeinschaften (Armstrong et al. 2016; Lüdemann 2025).

1.6. Forschungslücke und Zielsetzung

Aus den dargestellten Erkenntnissen ergeben sich mehrere Forschungslücken. Es wurden bislang überwiegend FFPV-Anlagen in ariden Gebieten untersucht, Forschungen zu FFPV in Grasland und Ackerland sind deutlich seltener (Gómez-Catasús et al. 2024). Außerdem beruhen viele Studien auf einzelnen Untersuchungsstandorten. Laut (Gómez-Catasús et al. 2024) haben 53 % der von Ihnen untersuchten Studien nur eine PV-Anlage betrachtet und häufig auch die Ausgangssituation nicht untersucht. Eine Erweiterung der Datenlage wäre durch Untersuchungen an FFPV-Anlagen unterschiedlichen Alters sowie unterschiedlicher Vornutzung möglich (Rosenthal et al. 2024). Dadurch ist bislang nur unzureichend geklärt, ob kleinräumige Effekte innerhalb von FFPV-Anlagen auch unter unterschiedlichen Standortbedingungen reproduzierbar auftreten. Des Weiteren gibt es bisher wenige Studien, die sich auf die ganzheitliche Biodiversität fokussieren, häufig liegt der Fokus auf einzelne ökologische Zielgrößen wie Insekten oder Vegetation (Lafitte et al. 2023). Eine gründlichere Untersuchung von PV auf die Biodiversität wird von ebenfalls empfohlen, zum Beispiel durch standardisierte Protokolle, die Untersuchung der Biodiversität in anderen Lebenszyklusphasen der PV-Anlage und mehr Langzeitstudien (Järviö et al. 2026; Lafitte et al. 2023; Wilder Ecology 2025).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, den Einfluss PV-Modulen auf die Biodiversität, Biomasseproduktion und Futterqualität von extensiv bewirtschaftetem Grünland in drei FFPV-Anlagen zu untersuchen. Dabei werden unterschiedliche Positionen betrachtet, die sich an verschiedenen Standorten unter oder neben den PV-Modulen befinden. Durch den Vergleich mehrerer FFPV-Anlagen soll geprüft werden, inwieweit beobachtete Effekte standortübergreifend auftreten oder von den jeweiligen Standortbedingungen abhängen. Zusätzlich werden Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff verwendet, um Unterschiede in den Standortbedingungen zwischen den Positionen abzubilden. Die Ellenberg-Zeigerwerte ordnen Pflanzenarten anhand ihrer Ansprüche entlang wichtiger Umweltgradienten ein, darunter Licht, Feuchte und Nährstoffverfügbarkeit. Die Pflanzenarten werden anhand ihrer Präferenzen auf einer Skala von 1 bis 9 bewertet, wobei niedrige und hohe Werte unterschiedliche Ausprägungen des jeweiligen Standortfaktors anzeigen. Sie ermöglichen dadurch, aus der Artenzusammensetzung indirekt auf die vorherrschenden Standortbedingungen zu schließen (Tichý et al. 2023). Für die Untersuchung von FFPV-Anlagen sind sie besonders geeignet, da PV-Module kleinräumige Veränderungen der Licht-, Feuchte- und Nährstoffverhältnisse verursachen können (Armstrong et al. 2016; Vervloesem et al. 2022). Ellenberg-Zeigerwerte wurden bereits eingesetzt, um die Auswirkungen von PV auf die Vegetation zu untersuchen. Dabei zeigten sich anhand der vorkommenden Pflanzenarten Unterschiede zwischen den Bereichen unter den PV-Modulen, zwischen den PV-Modulreihen und außerhalb der PV-Module. Die Ellenberg-Zeigerwerte zeigten dabei für die Bereiche unter den Modulen eine Verschiebung hin zu Pflanzenarten mit Präferenzen für schattigere

und feuchtere Standortbedingungen. Damit bieten Ellenberg-Zeigerwerte die Möglichkeit, Veränderungen der Standortbedingungen anhand der Reaktion der Vegetation abzubilden (Bienvenu et al. 2026; Lambert et al. 2023; Uldrijan et al. 2023; Vervloesem et al. 2022).

Aus dieser Zielsetzung ergeben sich folgende Forschungsfragen:

F1) Kommt es zu einer Veränderung der Biodiversität des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von der Beschattung durch die PV-Module?

F2) Kommt es zu einer Veränderung der mittleren Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff in Abhängigkeit von der Beschattung durch die PV-Module?

F3) Kommt es zu einer Veränderung der Biomasseproduktion des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von der Beschattung durch die PV-Module?

F4) Kommt es zu einer Veränderung der Futterqualität des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von der Beschattung durch die PV-Module?

2. Material und Methoden

2.1. Untersuchungsstandorte

Es wurden die drei FFPV-Anlagen „Solarpark Gottesgabe“ (GG) in Brandenburg, „Solarpark Lauterbach“ (LB) in Hessen und „Solarpark Klein Rheide“ (KR) in Schleswig-Holstein untersucht.

2.1.1. Solarpark Gottesgabe

Der Solarpark GG befindet sich in Brandenburg, etwa 60 km östlich von Berlin in der Gemeinde Neuhausen. Es ist einer der größten Solarparks Deutschlands. Der Solarpark wird von der Energie Baden-Württemberg AG betrieben und wurde 2021 mit einer installierten Leistung von 150 Megawatt (MW) in Betrieb genommen. Insgesamt umfasst der Solarpark rund 350.000 PV-Module. Die PV-Modulreihen weisen Abstände zwischen 2,5 m und 8,31 m auf. Der Neigungswinkel beträgt 20°. Die Unterkante der PV-Module befindet sich mindestens 0,8 m über dem Boden, während die Oberkante eine maximale Höhe von 3 m erreicht (EnBW). Der Solarpark erstreckt sich über eine Gesamtfläche von 133 ha, von denen 122 ha mit PV-Modulen bebaut sind. Der Bodentyp wird als Braunerde-Podsol bzw. Podsol-Braunerde aus trockenen, nährstoffarmen Sanden beschrieben, und die Bodenart entspricht Lehmsand (Sonne sammeln). Vor der Errichtung des Solarparks wurde die Fläche landwirtschaftlich genutzt, wies jedoch nur eine geringe Ertragsfähigkeit auf. Zur Förderung der Biodiversität wurden verschiedene Maßnahmen zum Erhalt heimischer Tierarten umgesetzt, darunter die Anlage von Hecken entlang des Solarparks sowie die Schaffung von Trittsteinbiotopen (EnBW). Die Flächenpflege erfolgt durch eine extensive, zweischürige Mahd, deren erster Schnitt nicht vor Juni stattfindet. Teilweise wird die Vegetation zusätzlich durch Schafbeweidung gepflegt. Auf eine Einsaat mit regionalem Saatgut wurde verzichtet (Sonne sammeln).

2.1.2. Solarpark Lauterbach

Der Solarpark LB befindet sich in Hessen, etwa 1,5 km südlich von Frischborn, und wurde im Jahr 2022 in Betrieb genommen. Der Solarpark wird von ENERPARC betrieben, verfügt über eine installierte Leistung von 54,7 MW und erstreckt sich über eine Fläche von 46,4 ha. Insgesamt sind rund 125.000 PV-Module installiert. Vor der Errichtung des Solarparks wurde die Fläche ackerbaulich genutzt. Die PV-Modulreihen weisen einen Reihenabstand von 1,2 m auf und sind mit einem Neigungswinkel von 18° installiert. Der Bodentyp wird als Braunerde/Pseudogley aus basaltgrushaltigem Lösslehm beschrieben, während die Bodenart den Tonschluffen zuzuordnen ist. Die Flächenpflege erfolgt derzeit durch Mahd, wobei das Mahdgut auf der Fläche verbleibt und nicht

abtransportiert wird. Teilweise erfolgt eine Beweidung der Flächen durch Schafe, jedoch nicht auf den in dieser Arbeit untersuchten Flächen. Im Zuge der Begrünung der Fläche wurde der regionale Saatgutmix „Lerchenmix“ der Wildsaaten AG ausgesät. Darüber hinaus wurden verschiedene Ausgleichs- und Naturschutzmaßnahmen umgesetzt. Hierzu zählen unter anderem die Entwicklung artenreicher Wiesenflächen, der Erhalt vorhandener Alleebäume sowie die Anlage von Blüh- und Altgrasstreifen (Sonne sammeln).

2.1.3. Solarpark Klein Rheide

Der Solarpark KR befindet sich in Schleswig-Holstein, etwa 1 km südlich des gleichnamigen Ortes im Kreis Schleswig-Flensburg und wurde in den Jahren 2015 bis 2019 in drei Bauabschnitten errichtet. Der Solarpark wird von der Wattmanufactur betrieben, verfügt über eine installierte Leistung von 22,9 MW und erstreckt sich über eine Fläche von 27 ha. Vor der Errichtung des Solarparks wurde die Fläche für den Kiesabbau genutzt. Die PV-Modulreihen weisen einen Reihenabstand von 3,5 m auf und sind mit einem Neigungswinkel von 15 ° installiert (Sonne sammeln). Insgesamt sind über 81.400 PV-Module installiert (Wattmanufactur). Der Bodentyp wird als Podsol/Braunerde-Podsol/Gley-Podsol aus sandigen Flussablagerungen beschrieben, während die Bodenart den Reinsanden zuzuordnen ist. Die Flächenpflege erfolgt durch eine ein- bis zweimal jährlich durchgeführte Mahd, wobei das Mahdgut von der Fläche entfernt wird. Ergänzend erfolgt eine Beweidung mit Schafen. Im Zuge der Begrünung der Fläche wurde regionales Saatgut ausgesät. Darüber hinaus wurden verschiedene Ausgleichs- und Naturschutzmaßnahmen umgesetzt. Hierzu zählen unter anderem der Erhalt vorhandener Knicks, die Anlage von Insektenhotels sowie die Schaffung wechselfeuchter Bereiche als Lebensraum für Amphibien (Sonne sammeln).

2.1.4. Meteorologische Bedingungen der Untersuchungsstandorte

Die meteorologischen Bedingungen am Untersuchungsstandort Solarpark GG wurden anhand der Daten der Wetterstation Müncheberg beschrieben, die sich ca. 20 km vom Solarpark GG entfernt befindet. Berücksichtigt wurde der Zeitraum von Juni 2024 bis Mai 2025, der den zwölf Monaten vor der Probenahme im Mai 2025 entspricht. Während dieses Zeitraums betrug die mittlere Temperatur 10,47 °C. Zudem wurde ein Gesamtniederschlag von 518,3 l/m² sowie eine Sonnenscheindauer von 2.104,9 Stunden erfasst. Eine detaillierte Auflistung der monatlichen meteorologischen Messwerte ist Tabelle 1 zu entnehmen (WetterKontor).

Tabelle 1: Meteorologische Daten der Wetterstation Müncheberg im Zeitraum Juni 2024 bis Mai 2025.

Zeitraum	Temperatur Mittel [°C]	Niederschlag Summe [l/m²]	Sonnenschein Summe [h]
2025/05	12,6	23,7	255,1
2025/04	11,2	10,4	246,2
2025/03	5,8	22,7	199,0
2025/02	0,3	28,5	108,3
2025/01	2,3	44,3	34,8
2024/12	3,5	36,1	31,0
2024/11	4,9	49,6	53,9
2024/10	10,9	24,1	136,6
2024/09	16,6	49,1	218,3
2024/08	20,3	29,5	299,5
2024/07	19,5	104,5	281,1
2024/06	17,7	95,8	241,1

Für den Solarpark LB wurden die meteorologischen Daten der Wetterstation Hoherodskopf herangezogen, die sich ca. 15 km vom Solarpark LB entfernt befindet. Zur Beschreibung der meteorologischen Bedingungen wurden die Daten des Zeitraums von Juli 2024 bis Juni 2025, also der zwölf Monate vor der Probenahme im Juni 2025, ausgewertet. Im betrachteten Zeitraum lag die durchschnittliche Temperatur bei 8,36 °C. Die Gesamtniederschlagsmenge betrug 813,1 l/m², während eine Sonnenscheindauer von 1.970,9 Stunden verzeichnet wurde. Die monatlichen Messwerte sind in Tabelle 2 dargestellt (WetterKontor).

Tabelle 2: Meteorologische Daten der Wetterstation Hoherodskopf im Zeitraum Juli 2024 bis Juni 2025.

Zeitraum	Temperatur Mittel [°C]	Niederschlag Summe [l/m²]	Sonnenschein Summe [h]
2025/06	16,1	79,9	264
2025/05	10,8	71,1	266,7
2025/04	8,9	27,4	248,3
2025/03	5,3	6,7	213,8
2025/02	-0,6	37,9	98,3
2025/01	0,5	81,6	66,7
2024/12	0,1	57,2	37,2
2024/11	2,9	65,7	55,2
2024/10	9	86,3	78,2
2024/09	13	132,1	149,1
2024/08	18	53,2	270,2
2024/07	16,3	114	223,2

Zur Beschreibung der meteorologischen Bedingungen am Solarpark KR wurden die Daten der Wetterstation Schleswig herangezogen, die sich ca. 15 km entfernt vom Solarpark KR befindet. Betrachtet wurde der Zeitraum der zwölf Monate vor der Probenahme im Juli 2025. Im

Untersuchungszeitraum betrug die durchschnittliche Temperatur 10,12 °C. Zudem wurden ein Gesamtniederschlag von 844,1 l/m² sowie eine Sonnenscheindauer von insgesamt 1.847,31 Stunden erfasst. Eine detaillierte Übersicht der monatlichen Messwerte ist Tabelle 3 zu entnehmen (WetterKontor).

Tabelle 3: Meteorologische Daten der Wetterstation Schleswig im Zeitraum August 2024 bis Juli 2025.

Zeitraum	Temperatur Mittel [°C]	Niederschlag Summe [l/m²]	Sonnenschein Summe [h]
2025/07	18,1	179,7	163,9
2025/06	16,0	64,6	250,7
2025/05	12,3	47,0	276,4
2025/04	9,7	45,1	230,9
2025/03	5,7	9,9	203,8
2025/02	2,0	12,8	70,3
2025/01	2,6	95,3	52,4
2024/12	5,0	93,2	12,7
2024/11	5,9	112,7	36,0
2024/10	10,9	63,7	122,9
2024/09	15,3	77,9	188,9
2024/08	17,9	42,2	238,41

2.2. Versuchsaufbau

Für die Untersuchung wurden die drei Solarparks GG , LB und KR ausgewählt, da sie räumlich weit voneinander entfernt und über verschiedene Regionen Deutschlands verteilt sind. Die Probennahme erfolgte in jedem Solarpark an jeweils zwei aufeinanderfolgenden Tagen. Im Solarpark GG wurde die Beprobung am 27. und 28. Mai 2025 durchgeführt. Die Erhebungen im Solarpark LB fanden am 11. und 12. Juni 2025 statt. Im Solarpark KR erfolgte die Probennahme am 15. und 16. Juli 2025. Das Versuchsdesign war in allen drei Solarparks identisch aufgebaut.

Jeder Solarpark wurde in drei Blöcke unterteilt, wie es in Abbildung 1 im Solarpark KR zu erkennen ist. Jeder Block umfasste drei Transekte. Zwei der Transekte verliefen unter den PV-Modulen und enthielten jeweils acht Aufnahmepunkte. Innerhalb dieser Transekte wurden vier unterschiedliche Positionen untersucht, die je Transekt zweimal erfasst wurden. Dadurch ergab sich für jede Position über die drei Blöcke hinweg eine zwölfmalige Wiederholung. Die untersuchten Positionen umfassten den Bereich zwischen zwei Modulreihen, im Folgenden als gap bezeichnet, den Bereich unter der oberen Modulkante, bezeichnet als halfshade, den mittleren Bereich unter dem Photovoltaikmodul, bezeichnet als shade, sowie den Bereich unter der unteren Modulkante, bezeichnet als edge.

Das dritte Transekt jedes Blocks befand sich auf einer unmittelbar an die Modultransekte angrenzenden Freifläche innerhalb des eingezäunten Solarparks und diente als Kontrollfläche. In diesem Transekt

wurde ausschließlich die Position free untersucht. Da das Transekt vier Aufnahmepunkte umfasste, wurde auch für diese Position über alle Blöcke hinweg eine zwölfmalige Wiederholung je Solarpark erreicht. Die Transekte und Positionen können aus Abbildung 2 entnommen werden.

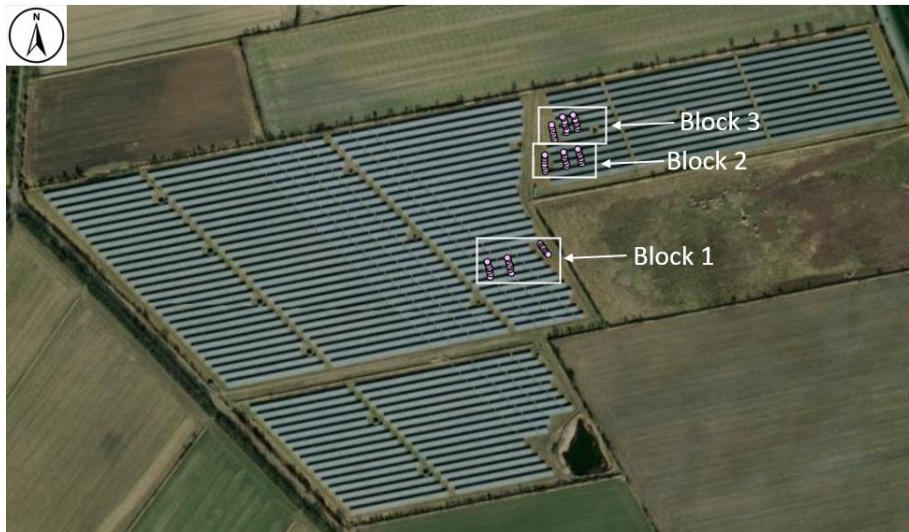


Abbildung 1: Die Lage der drei Untersuchungsblöcke im Solarpark KR.

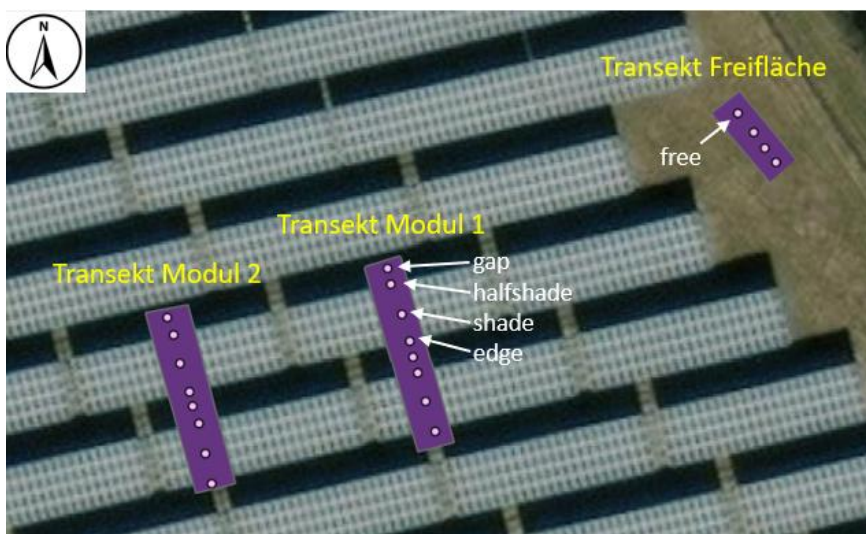


Abbildung 2: Die Anordnung der Transekte und Positionen innerhalb eines Blocks.

2.3. Durchführung

An jedem Aufnahmepunkt wurde ein Rahmen mit einer Größe von 50 cm mal 50 cm ausgelegt. Zunächst wurde der Deckungsgrad der Vegetation innerhalb des Rahmens bestimmt. Hierbei wurde erfasst, welcher Anteil der Bodenoberfläche durch Vegetation bedeckt war. Moose wurden dabei ebenfalls als Vegetationsdeckung berücksichtigt. Anschließend erfolgte die Schätzung der Anteile von Gräsern, Kräutern und Leguminosen innerhalb der aufgenommenen Vegetation.

Darauf aufbauend wurden sämtliche Pflanzenarten innerhalb des Rahmens bestimmt. Zur Artbestimmung wurden einschlägige Bestimmungsliteratur, wie den Rothmaler, sowie die App „Flora Incognita“ genutzt. Nach der Identifizierung der Arten wurde deren jeweiliger Anteil an der Gesamtvegetation in Prozent geschätzt. Dabei wurde stets mit den Arten mit dem geringsten Prozentwert begonnen. Sämtliche Schätzungen und Bestimmungen wurden während der gesamten Untersuchung von denselben Personen durchgeführt, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen.

Nach Abschluss der Bestimmung und Schätzung der Artenanteile wurde die Vegetation innerhalb des Rahmens bodennah gemäht. Das Pflanzenmaterial wurde anschließend in Crisp Bags verpackt, die Frischmasse im Feld gewogen und die Proben in Transportkisten mit Kühlakkus gelagert.

Zur Validierung der geschätzten Artenanteile wurden in jedem Solarpark die ersten beiden Proben nach dem Mähen unmittelbar vor Ort nach Arten sortiert. Die einzelnen Arten wurden getrennt gewogen und die ermittelten Gewichtsanteile mit den zuvor geschätzten prozentualen Anteilen verglichen. Dabei zeigte sich, dass die Schätzungen in der Regel nur geringe Abweichungen, in der Regel unter 5 %, von den anhand der Gewichte ermittelten Anteilen aufwiesen.

Bis zur weiteren Verarbeitung wurden sämtliche Proben tiefgekühlt gelagert. Anschließend erfolgte die Trocknung in einem Trockenschrank der Abteilung Graslandwissenschaft der Georg-August Universität Göttingen bei 60 °C über einen Zeitraum von zwei Tagen. Nach Abschluss der Trocknung wurden die Proben erneut gewogen, um das Trockengewicht zu bestimmen.

Abschließend wurden die Proben vermahlen. Die Proben wurden durch ein 4-mm-Sieb und anschließend durch ein 1-mm-Sieb vermahlen (Retsch SM 300 & Retsch ZM 200, Retsch GmbH, Haan, Deutschland). Danach wurden die Proben mittels Nahinfrarot-Reflexionsspektroskopie analysiert. Hierzu wurde jede Probe zweimal mit einem Phoenix 5000 (BlueSun Scientific Inc., MD, USA) gescannt. Die gemessenen Spektren wurden anschließend verarbeitet und mithilfe des auf einem zentralen Server hinterlegten Kalibrierungsdatensatzes (VDLUFa Qualitätssicherung, NIRS GmbH, Kassel, Deutschland) zur Vorhersage der jeweiligen Konzentrationen herangezogen.

2.4. Statistische Analyse

Sämtliche statistischen Analysen wurden in RStudio durchgeführt. Für die Auswertung wurden lineare gemischte Modelle verwendet. Dabei wurden Position, Solarpark sowie deren Interaktion als feste Effekte berücksichtigt. Der Block wurde als Zufallseffekt innerhalb der Solarparks modelliert:

Position × Park + (1 | Park/Block)

Die Signifikanz der festen Effekte wurde mittels Typ-III-Tests geprüft. Bei signifikanten Effekten wurden geschätzte marginale Mittelwerte berechnet und paarweise Vergleiche mit Tukey-Korrektur durchgeführt. Unterschiede wurden bei einem Signifikanzniveau von $p < 0,05$ als statistisch signifikant angesehen.

Die Artenzusammensetzung wurde auf Grundlage der Deckungsgrade mittels Bray-Curtis-Distanzen untersucht und durch eine zweidimensionale nichtmetrische multidimensionale Skalierung (NMDS) visualisiert. Der Einfluss von Position und Solarpark auf die Artenzusammensetzung wurde mittels einer permutativen Varianzanalyse (PERMANOVA) untersucht. Unterschiede in der Artenzusammensetzung wurden mittels PERMANOVA getestet. Bei einer signifikanten Interaktion zwischen Position und Solarpark wurden zusätzlich separate PERMANOVAs für die einzelnen Solarparks sowie paarweise Vergleiche zwischen den Positionen durchgeführt. Die Homogenität der multivariaten Streuung wurde mittels Betadisper überprüft.

Für jede Vegetationsaufnahme wurden die Diversitätsmaße Species Richness, Shannon-Index und Evenness berechnet und mit dem oben beschriebenen linearen gemischten Modell ausgewertet.

Der Shannon-Index (H') wurde nach folgender Formel berechnet:

$$H' = - \sum_{i=1}^S p_i \ln(p_i)$$

wobei S die Anzahl der in der jeweiligen Vegetationsaufnahme erfassten Arten und p_i den relativen Anteil der Art i an der Gesamtzahl der Individuen bezeichnet. Der Shannon-Index berücksichtigt somit sowohl die Artenzahl als auch die relative Häufigkeit der einzelnen Arten. Höhere Werte weisen auf eine höhere Diversität hin (Härdtle 2024).

Die Evenness (E) wurde als Verhältnis des beobachteten Shannon-Index zur maximal möglichen Shannon-Diversität bei gleichmäßiger Verteilung der Individuen auf alle Arten berechnet:

$$E = \frac{H'}{\ln(S)}$$

Die Evenness nimmt Werte zwischen 0 und 1 an. Ein Wert $E=1$ von entspricht einer vollständig gleichmäßigen Verteilung der Individuen auf alle vorhandenen Arten, während niedrigere Werte auf eine ungleichmäßigere Verteilung hinweisen (Härdtle 2024).

Zur Beschreibung des Artenspektrums wurden Artenakkumulationskurven auf Grundlage zufällig permutierter Aufnahmereihenfolgen erstellt. Ergänzend wurden Venn-Diagramme mit der Website „Bioinformatics & Evolutionary Genomics“ erstellt, um gemeinsame sowie ausschließlich an einzelnen Positionen vorkommende Pflanzenarten innerhalb der Solarparks darzustellen.

Die Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff wurden anhand der Datenbank JUICE.NET und ergänzend mit der Website FloraWeb ermittelt. Pflanzen, für die aufgrund einer unvollständigen Bestimmung oder fehlender eindeutiger Zuordnung keine Ellenberg-Zeigerwerte vorlagen, wurden von der Berechnung ausgeschlossen und in Tabelle A7 aufgeführt. Arten mit indifferentem Verhalten wurden ebenfalls von der Berechnung ausgeschlossen. Da *Taraxacum spec.* und *Elymus spec.* häufig vorkamen, wurden sie den entsprechenden Referenzarten *Taraxacum officinale* bzw. *Elymus repens* zugeordnet. *Taraxacum spec.* wurde in 55 Aufnahmen mit einer Gesamtdeckung von 1.488,5 % und *Elymus spec.* in 48 Aufnahmen mit einer Gesamtdeckung von 1.316,1 % erfasst. Die übrigen nicht eindeutig zuordenbaren Taxa traten insgesamt in weniger als 50 Aufnahmen auf und erreichten eine Gesamtdeckung von weniger als 500 %, sodass sie aufgrund des geringeren Anteils ausgeschlossen wurden und keiner Referenzart zugeordnet wurden.

Zur Bewertung der Futterqualität wurde die metabolisierbare Energie (ME) des Grünlandaufwuchses berechnet. Die ME beschreibt die Energiemenge eines Futtermittels, die nach Abzug der Energieverluste über Kot, Harn und gasförmige Ausscheidungen für den Stoffwechsel des Tieres zur Verfügung steht und stellt eine zentrale Kenngröße zur Bewertung des energetischen Futterwertes dar (Gerster et al. 2025; Losand et al. 2007). Die Berechnungen erfolgten nach der von (Siede et al. 2026) verwendete Gleichung nach (Losand et al. 2007):

ME (MJ kg⁻¹ TM) =

$$5,51 + 0,00827 \times \text{ESOM (g kg}^{-1} \text{ TM)} - 0,0051 \times \text{XA (g kg}^{-1} \text{ TM)} + 0,0251 \times \text{XL (g kg}^{-1} \text{ TM)}$$

wobei die enzymatisch lösliche organische Substanz (ESOM) als

$$\text{ESOM (g kg}^{-1} \text{ TM)} = 1.000 - \text{EISOM (g kg}^{-1} \text{ TM)} - \text{XA (g kg}^{-1} \text{ TM)}$$

berechnet wurde. Dabei entspricht Eulos der enzymatisch unlöslichen organischen Substanz (EISOM), XA der Rohasche und XL dem Rohfett. Die berechneten ME-Werte wurden anschließend zusammen mit den anderen Futterqualitätsparametern Rohprotein, Rohfaser, Säure-Detergenzien-Faser (ADF) und Neutral-Detergenzien-Faser (NDF) mit linearen gemischten Modellen analysiert.

3. Ergebnisse

3.1. Biodiversität

3.1.1. Artenzusammensetzung

Die Unterschiede in der Artenzusammensetzung zwischen den Vegetationsaufnahmen sind in der NMDS-Ordination dargestellt (Abbildung 3). Die Ordination zeigt eine Gruppierung der Vegetationsaufnahmen entsprechend der drei Solarparks. Dabei sind Überschneidungen zwischen den Solarparks erkennbar, während sich die Vegetationsaufnahmen aus LB und KR weitgehend voneinander abgrenzen. Innerhalb der Parkgruppen sind die Positionen nicht eindeutig voneinander getrennt.

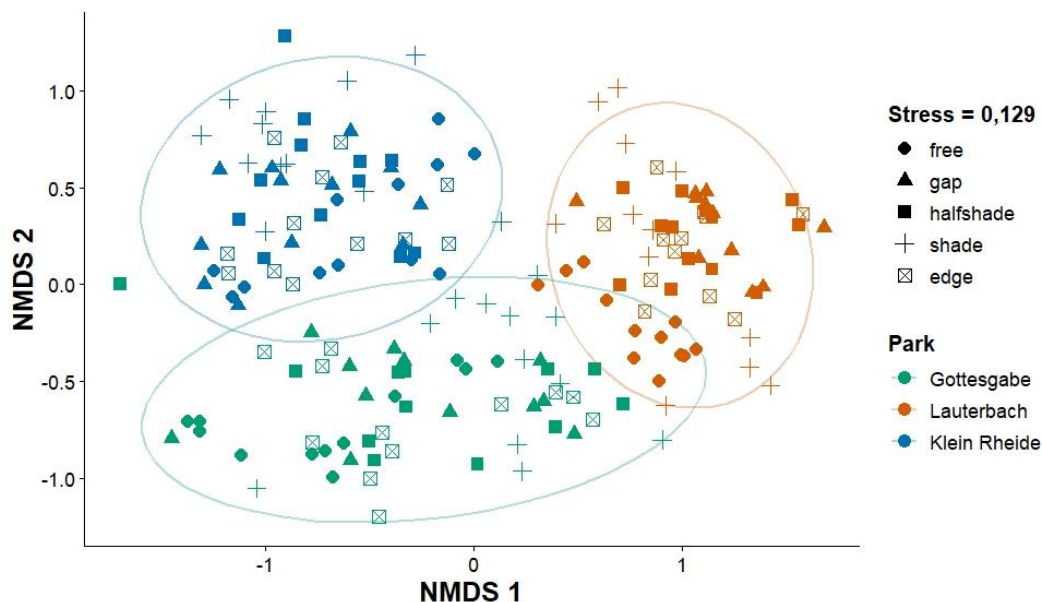


Abbildung 3: NMDS-Ordination der Vegetationsaufnahmen auf Basis der Artenzusammensetzung in den drei untersuchten Solarparks. Farben kennzeichnen die Solarparks, Symbole die Positionen. Die Ellipsen umfassen die Gruppierung der Vegetationsaufnahmen innerhalb der Solarparks. Der Stress-Wert der zweidimensionalen Lösung beträgt 0,129.

Die PERMANOVA in Tabelle 4 ergab einen signifikanten Einfluss der Kombination aus Position und Solarpark auf die Artenzusammensetzung. Auch innerhalb der einzelnen Solarparks unterschieden sich die Artenzusammensetzungen zwischen den Positionen signifikant. Die stärkste Erklärungskraft wurde für LB festgestellt, gefolgt von KR und GG.

Die paarweisen PERMANOVA-Vergleiche in Tabelle A10 im zeigten parkabhängige Unterschiede in der Artenzusammensetzung. In GG unterschieden sich nach Anpassung der p-Werte lediglich die Artenzusammensetzung in den Positionen free und shade ($p = 0,005$) sowie shade und edge ($p = 0,005$) signifikant voneinander. In LB wurden signifikante Unterschiede zwischen den Positionen free und gap ($p = 0,002$), free und halfshade ($p = 0,002$), free und shade ($p = 0,003$), free und edge ($p = 0,002$), gap und shade ($p = 0,002$), halfshade und shade ($p = 0,002$) sowie shade und edge ($p = 0,003$) festgestellt.

In KR unterschieden sich die Positionen free und halfshade ($p = 0,032$), free und shade ($p = 0,003$), free und edge ($p = 0,043$), gap und shade ($p = 0,003$), halfshade und shade ($p = 0,003$) sowie shade und edge ($p = 0,003$) signifikant voneinander.

Tabelle 4: Ergebnisse der PERMANOVA zur Untersuchung des Einflusses von Position und Solarpark auf die Artenzusammensetzung aller Vegetationsaufnahmen.

Analyse	df	F	R ²	p-Wert
Gesamt	8	3,39	0,100	0,001
GG	4	2,06	0,130	0,001
LB	4	6,83	0,332	0,001
KR	4	2,72	0,165	0,001

Die Betadisper-Analyse in Tabelle A11 ergab für GG und KR keine signifikanten Unterschiede in der multivariaten Streuung der Positionen. Für LB wurde dagegen eine signifikante Heterogenität der multivariaten Streuung festgestellt.

3.1.2. Diversitätsmaße

Für die Species Richness zeigte sich eine signifikante Interaktion zwischen Position und Solarpark. Die Ergebnisse der linearen gemischten Modelle sind in Tabelle 5 zusammengefasst. Die geschätzten marginalen Mittelwerte verdeutlichen unterschiedliche Muster zwischen den Solarparks. In GG wurde die höchste Species Richness an der Position gap ($8,17 \pm 0,65$) und die niedrigste an shade ($5,42 \pm 0,65$) geschätzt, zwischen beiden Positionen bestand ein signifikanter Unterschied ($p = 0,002$). In LB wurden die höchsten Artenzahlen an der Position free ($5,50 \pm 0,65$) und die niedrigsten an gap ($3,42 \pm 0,65$) geschätzt, wobei sich diese Positionen signifikant unterschieden ($p = 0,040$). In KR wurden die höchsten Werte an der Position free ($7,58 \pm 0,65$) und die niedrigsten an shade ($3,67 \pm 0,65$) ermittelt, zwischen beiden Positionen bestand ein signifikanter Unterschied ($p = <0,001$). Die vollständigen Ergebnisse der geschätzten marginalen Mittelwerte sowie der Tukey-Post-hoc-Tests befinden sich in Tabelle A12, Tabelle A13 und Tabelle A14.

Für den Shannon-Index zeigte sich ebenfalls eine signifikante Interaktion zwischen Position und Solarpark. Die geschätzten marginalen Mittelwerte zeigten auch für den Shannon-Index unterschiedliche Muster zwischen den Solarparks. In GG wurde der höchste Shannon-Index an der Position edge ($1,38 \pm 0,12$) und der niedrigste an der Position shade ($0,82 \pm 0,12$) geschätzt. Der Tukey-Post-hoc-Test ergab einen signifikanten Unterschied zwischen diesen beiden Positionen ($p = 0,007$). In LB wurde der höchste Shannon-Index an der Position free ($1,16 \pm 0,12$) und der niedrigste an der Position gap ($0,64 \pm 0,12$) geschätzt. Auch zwischen diesen Positionen bestand ein signifikanter Unterschied ($p = 0,012$). In KR wurde der höchste Shannon-Index an der Position edge ($1,33 \pm 0,12$)

und der niedrigste an der Position shade ($0,87 \pm 0,12$) geschätzt. Zwischen den Positionen wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt.

Für die Evenness wurde ein signifikanter Einfluss der Position nachgewiesen. Weder der Solarpark noch die Interaktion zwischen Position und Solarpark waren signifikant. Die geschätzten marginalen Mittelwerte zeigten für die Evenness geringere Unterschiede zwischen den Positionen als für Species Richness und Shannon-Index. In GG wurde der höchste Evenness-Wert an der Position edge ($0,73 \pm 0,06$) und der niedrigste an der Position shade ($0,49 \pm 0,06$) geschätzt. Zwischen diesen beiden Positionen bestand ein signifikanter Unterschied ($p = 0,022$). In LB wurde die höchste Evenness an der Position free ($0,70 \pm 0,06$) und die niedrigste an der Position gap ($0,56 \pm 0,06$) geschätzt. Zwischen den Positionen wurden jedoch keine signifikanten Unterschiede festgestellt. In KR wurde der höchste Evenness-Wert an der Position shade ($0,75 \pm 0,06$) und der niedrigste an der Position gap ($0,62 \pm 0,06$) geschätzt. Auch hier ergaben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Positionen.

Tabelle 5: Ergebnisse der linearen gemischten Modelle zur Untersuchung des Einflusses der Position, des Solarparks sowie ihrer Interaktion auf Species Richness, Shannon-Index und Evenness.

Diversitätsmaß	Effekt	χ^2	df	p
Species Richness	Position	14,321	4	0,006
Species Richness	Park	5,309	2	0,070
Species Richness	Position x Park	31,922	8	<0,001
Shannon-Index	Position	13,765	4	0,008
Shannon-Index	Park	0,804	2	0,669
Shannon-Index	Position x Park	17,641	8	0,024
Evenness	Position	11,329	4	0,023
Evenness	Park	0,740	2	0,691
Evenness	Position x Park	14,469	8	0,070

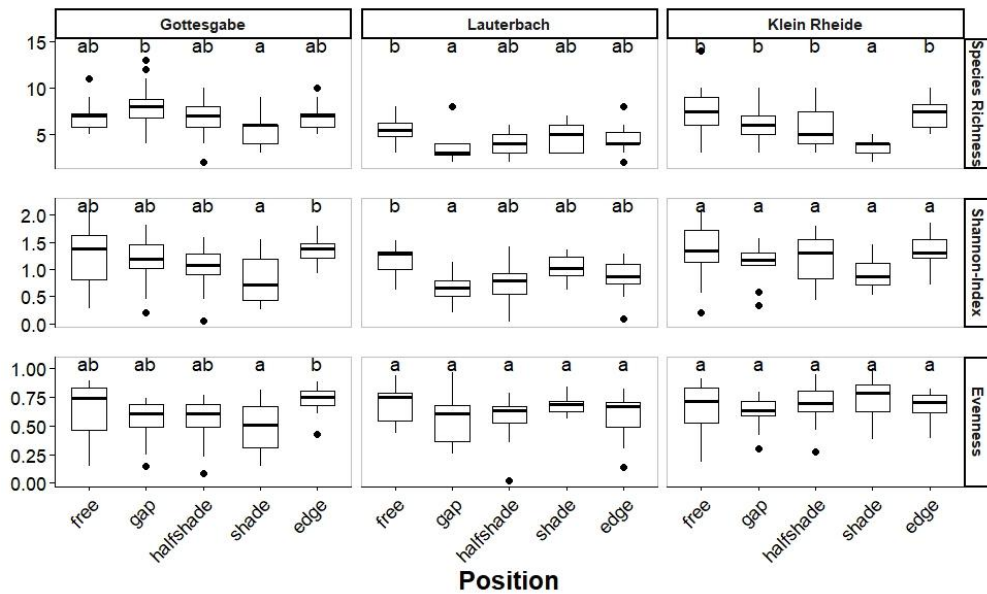


Abbildung 4: Species Richness, Shannon-Index und Evenness der Vegetationsaufnahmen in Abhängigkeit von Position und Solarpark. Dargestellt sind Median, Interquartilsabstand, Spannweite und Ausreißer. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks auf Grundlage der Tukey-Post-hoc-Vergleiche ($p < 0,05$).

3.1.3. Artenspektrum

Die Artenakkumulationskurven in Abbildung 5 zeigen Unterschiede im Artenspektrum der fünf Positionen innerhalb der drei Solarparks. In GG wurde die höchste kumulative Artenzahl an der Position gap erreicht. In LB wurden die höchsten kumulativen Artenzahlen an den Positionen shade erfasst. In KR wurde die höchste kumulative Artenzahl an der Position edge erreicht.

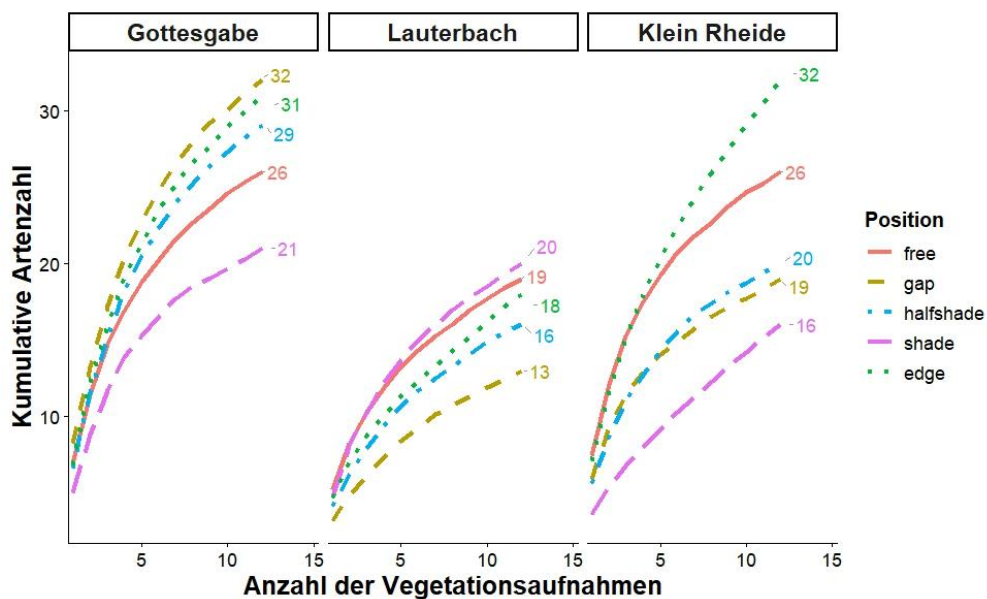


Abbildung 5: Kumulative Artenanzahl in Abhängigkeit von der Anzahl der Vegetationsaufnahmen für die fünf Positionen in den Solarparks. Die Zahlen am Ende der Kurven geben die insgesamt erfasste Artenzahl je Position an. Die Kurven basieren auf gemittelten Artenakkumulationskurven aus zufällig permutierten Reihenfolgen der Vegetationsaufnahmen, wodurch der Einfluss der Aufnahmereihenfolge reduziert wurde.

Die Venn-Diagramme in Abbildung 6 veranschaulichen die Überschneidungen des Artenspektrums zwischen den fünf Positionen innerhalb der drei Solarparks. In GG wurden fünf Arten, in LB sechs Arten und in KR fünf Arten an allen fünf Positionen gemeinsam nachgewiesen. Gleichzeitig traten an den einzelnen Positionen auch ausschließlich dort vorkommende Arten auf. Die vollständigen Artenlisten mit Pflanzennamen der einzelnen Positionskombinationen sind in Tabelle A15 aufgelistet.

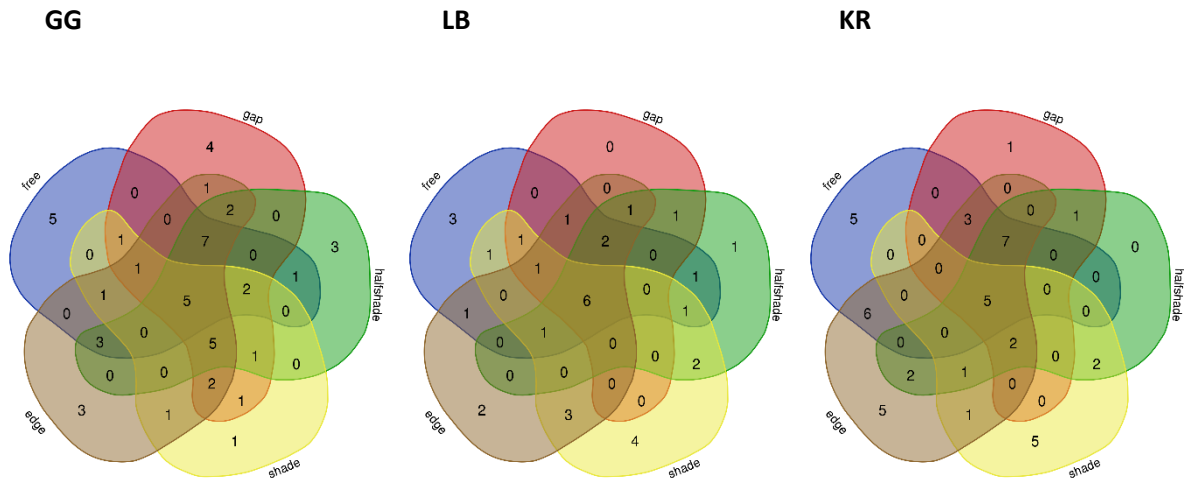


Abbildung 6: Artenüberschneidungen der fünf Positionen innerhalb der Solarparks.. Die Zahlen geben die Anzahl gemeinsamer bzw. ausschließlich an den jeweiligen Positionen vorkommender Pflanzenarten an.

3.2. Ellenberg-Zeigerwerte

Die Ellenberg-Zeigerwerte für Licht wurden sowohl von der Position ($p = 0,023$) als auch vom Park ($p = 0,038$) beeinflusst. Die Interaktion zwischen Position und Park war nicht signifikant. Die Ergebnisse der linearen gemischten Modelle sind in Tabelle A16 dargestellt.

Die geschätzten Randmittel lagen in GG zwischen 7,57 (shade) und 7,94 (edge). Ein signifikanter Unterschied wurde ausschließlich zwischen shade und edge festgestellt (mittlere Differenz = $-0,37$; $t = -3,27$; $p = 0,011$). In LB unterschieden sich die geschätzten Randmittel nur geringfügig (7,28–7,35), ohne dass signifikante Unterschiede zwischen den Positionen auftraten. In KR wurden die niedrigsten geschätzten Randmittel für die Position shade (6,99) und die höchsten für free (7,43) ermittelt. Die Position shade unterschied sich signifikant von den Positionen free, gap, halfshade und edge, während zwischen diesen vier Positionen keine signifikanten Unterschiede bestanden. Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche sind in Tabelle A18 aufgeführt.

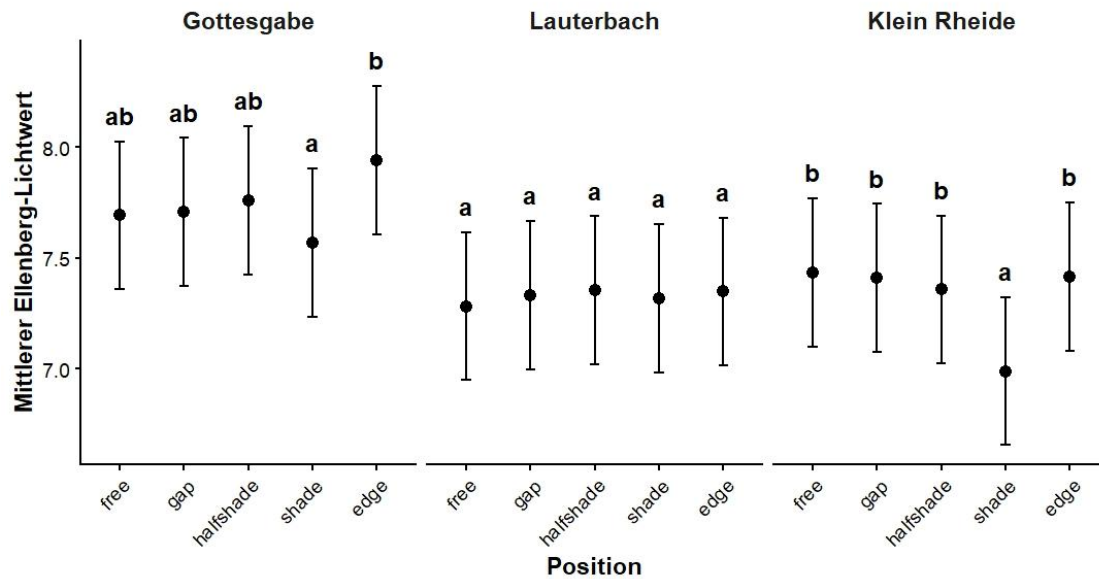


Abbildung 7: Gewichtete Ellenberg-Lichtwerte in den fünf Positionen der drei Solarparks GG, LB und KR. Dargestellt sind die geschätzten Randmittel (Estimated Marginal Means) $\pm$ 95 %-Konfidenzintervalle aus dem linearen gemischten Modell. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks (Tukey-Test, $p < 0,05$).

Für die Ellenberg-Zeigerwerte für Feuchte zeigte sich eine signifikante Interaktion zwischen Position und Park ($p < 0,001$). In GG lagen die geschätzten Randmittel zwischen 3,54 (free) und 3,78 (shade), wobei keine signifikanten Unterschiede zwischen den Positionen festgestellt wurden. In LB wurden die niedrigsten geschätzten Randmittel für free (4,56) und die höchsten für gap (6,10) ermittelt. Die Positionen gap (6,10), halfshade (5,98) und edge (5,92) wiesen signifikant höhere Ellenberg-Feuchtwerte auf als free (4,56). Darüber hinaus lag der geschätzte Randmittelwert der Position shade (5,17) signifikant unter den Werten von gap, halfshade und edge, jedoch über dem von free. In KR lagen die geschätzten Randmittel zwischen 4,67 (free) und 5,15 (shade). Ein signifikanter Unterschied wurde lediglich zwischen free und shade festgestellt, während sich die übrigen Positionen nicht signifikant voneinander unterschieden.

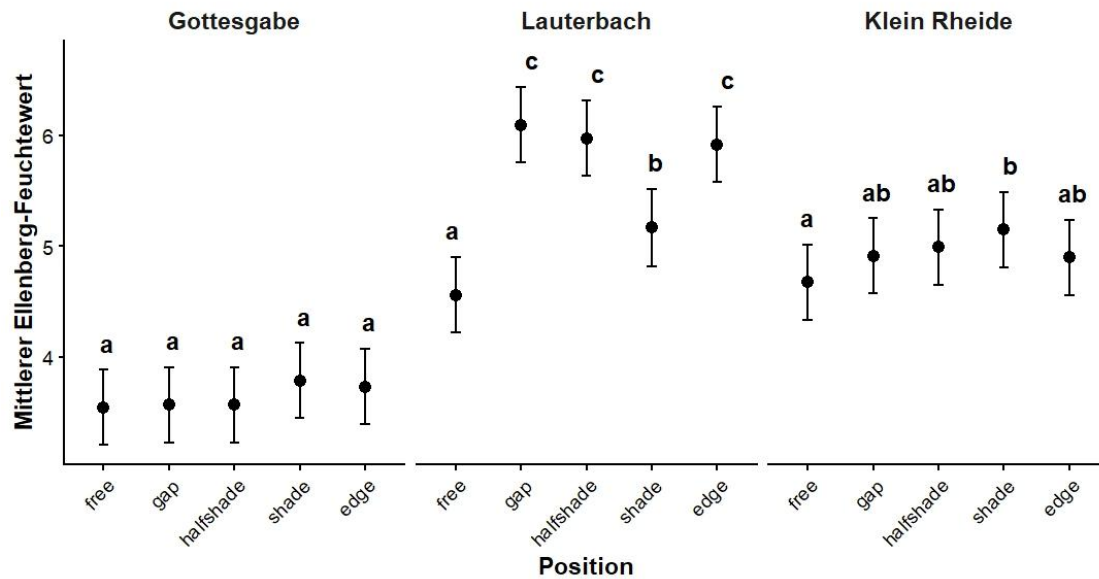


Abbildung 8: Gewichtete Ellenberg-Feuchtwerte in den fünf Positionen der drei Solarparks GG , LB und KR . Dargestellt sind die geschätzten Randmittel (Estimated Marginal Means) $\pm$ 95 %-Konfidenzintervalle aus dem linearen gemischten Modell. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks (Tukey-Test, $p < 0,05$).

Die Ellenberg-Zeigerwerte für Stickstoff zeigten eine signifikante Interaktion zwischen Position und Park ($p < 0,001$). In GG wurden die niedrigsten geschätzten Randmittel für free (3,41) und die höchsten für shade (5,04) ermittelt. Die Position free unterschied sich signifikant von den Positionen gap, halfshade, shade und edge, während zwischen den übrigen Positionen keine signifikanten Unterschiede bestanden. In LB lagen die geschätzten Randmittel zwischen 6,13 (free) und 6,90 (shade), ohne dass signifikante Unterschiede zwischen den Positionen festgestellt wurden. In KR wurden die niedrigsten geschätzten Randmittel für free (4,55) und die höchsten für shade (6,52) ermittelt. Die Positionen halfshade und shade wiesen signifikant höhere Ellenberg-Stickstoffwerte auf als free, gap und edge.

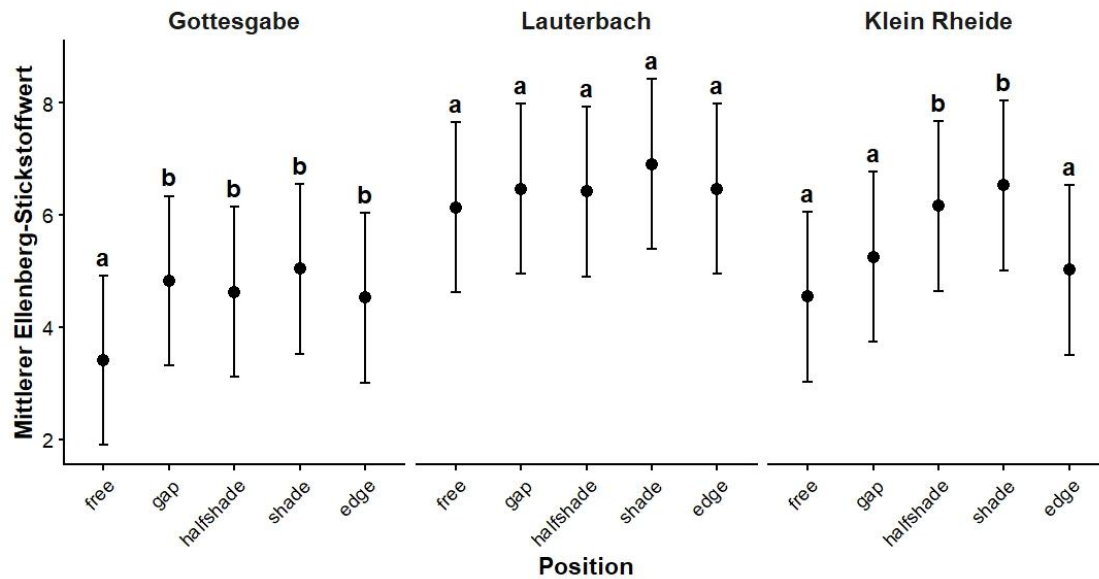


Abbildung 9: Gewichtete Ellenberg-Stickstoffwerte in den fünf Positionen der drei Solarparks GG , LB und KR . Dargestellt sind die geschätzten Randmittel (Estimated Marginal Means) $\pm$ 95 %-Konfidenzintervalle aus dem linearen gemischten Modell. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks (Tukey-Test, $p < 0,05$).

3.3. Biomasse

Die Interaktion zwischen Position und Park beeinflussten das Gewicht der Trockenmasse. Die Ergebnisse des linearen gemischten Modells sind in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse des linearen gemischten Modells (Typ-III-Varianzanalyse) zur Untersuchung des Einflusses der Position, des Solarparks sowie ihrer Interaktion auf die TM des Grünlandaufwuchses.

Effekt	F	df	p-Wert
Position	17,56	4;163	< 0,001
Park	5,98	2;163	0,003
Position x Park	2,73	8;163	0,008

Die TM variierte zwischen den Positionen und den drei Solarparks (Abbildung 10). Die mittleren TM sind in Tabelle A21 detailliert dargestellt. Die höchste TM wurden in den Positionen gap in GG (55,2 g) und KR (57,3 g) sowie in der Position free in LB (57,0 g) ermittelt. Die geringsten mittleren TM wurden in allen drei Solarparks in der Position shade gemessen und lagen zwischen 13,1 g (LB) und 17,0 g (KR). Die größten Unterschiede zwischen den Solarparks traten in der Position free auf. Hier betrug die mittlere TM in GG 22,6 g, während in KR und LB 54,1 g beziehungsweise 57,0 g erreicht wurden.

Die Ergebnisse der paarweisen Vergleiche innerhalb der einzelnen Solarparks sind in Tabelle A20 detailliert dargestellt. Im Solarpark GG wies die Position gap die höchsten geschätzten Randmittel auf

und unterschied sich unter anderem von der Position shade ($p < 0,001$) sowie von der Position edge ($p = 0,030$). Im Solarpark KR unterschied sich ausschließlich die Position shade von den übrigen Positionen. Der größte Unterschied bestand zwischen gap und shade ($p < 0,001$). Ein vergleichbares Ergebnis zeigte sich im Solarpark LB, wo ebenfalls die Position shade von allen übrigen Positionen abwich. Der größte Unterschied wurde zwischen free und shade festgestellt ($p < 0,001$).

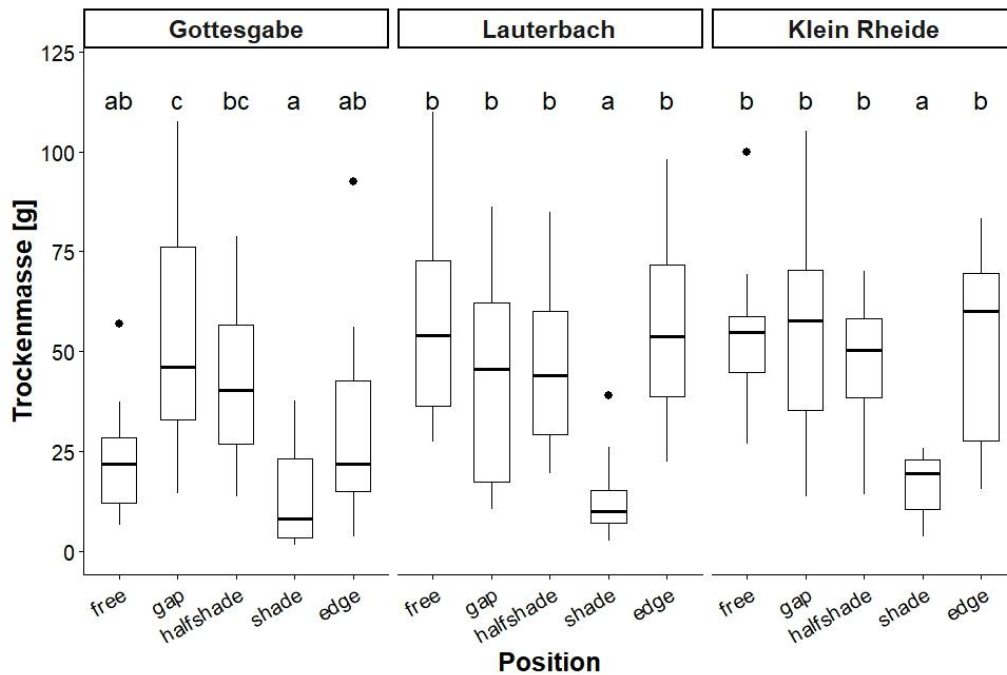


Abbildung 10: TM des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von der Position in den drei untersuchten FFPV-Anlagen. Dargestellt sind Boxplots mit Median, Interquartilsabstand sowie Minimum und Maximum (ohne Ausreißer); Punkte kennzeichnen Ausreißer. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks auf Grundlage eines linearen gemischten Modells mit Tukey-HSD-Post-hoc-Test ($p < 0,05$).

3.4. Futterqualität

Das lineare gemischte Modell ergab keinen signifikanten Effekt der Position auf die ME (Metabolisierbare Energie). Ebenso wurde kein signifikanter Interaktionseffekt zwischen Position und Park festgestellt. Für den Faktor Park wurde dagegen ein signifikanter Effekt festgestellt ($p = 0,004$). Die Ergebnisse des linearen gemischten Modells zur ME sind in Tabelle A22 dargestellt.

Die Tukey-Post-hoc-Analyse ergab einen signifikanten Unterschied der ME zwischen den Parks Gottesgabe und Klein Rheide ($p = 0,033$). Zwischen den Parks Gottesgabe und Lauterbach sowie Lauterbach und Klein Rheide wurden keine signifikanten Unterschiede festgestellt. Die vollständigen geschätzten Mittelwerte sowie die Ergebnisse der Tukey-Post-hoc-Analyse für den Faktor Park sind den Tabelle A23 und Tabelle A24 zu entnehmen.

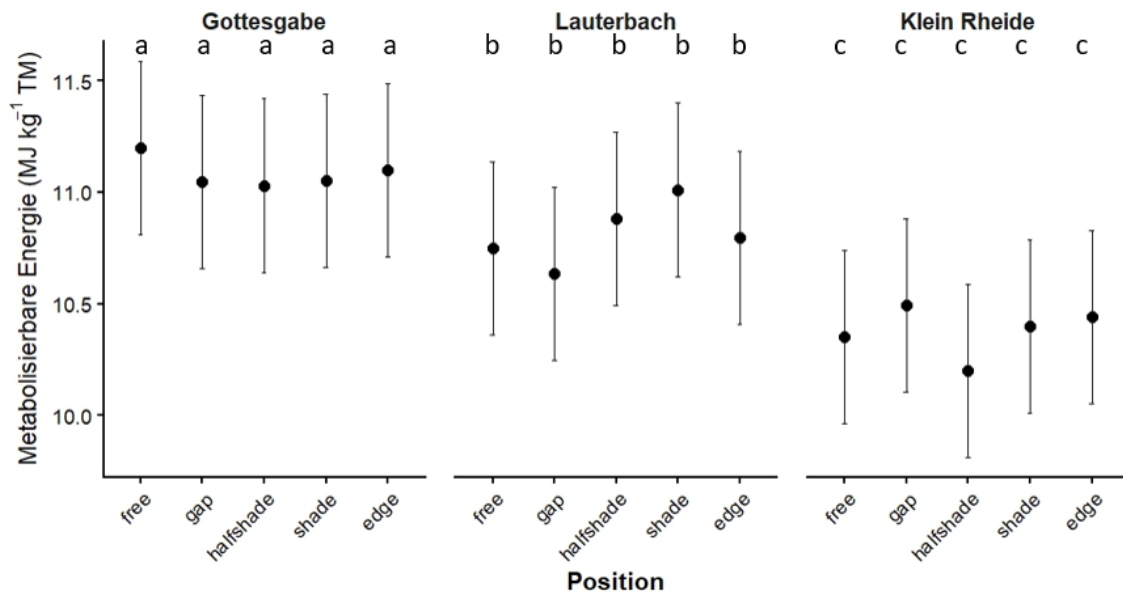


Abbildung 11: Geschätzte Mittelwerte (Estimated Marginal Means, EMMs) der metabolisierbaren Energie des Grünlandaufwuchses an den fünf Positionen in den drei Solarparks. Fehlerbalken stellen die 95 %-Konfidenzintervalle des linearen gemischten Modells dar. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks.

Für den Rohproteingehalt wurde eine signifikante Interaktion zwischen den beiden Faktoren ($p = 0,003$) nachgewiesen. Die paarweisen Vergleiche zeigten innerhalb aller drei Solarparks deutliche Unterschiede zwischen mehreren Positionen, wobei sich insbesondere die Position shade von den übrigen Positionen abhob. Die größten Mittelwertsdifferenzen traten jeweils zwischen den Positionen free und shade auf und betrugen 111,1 g/kg in Gottesgabe ($p < 0,001$), 101,3 g/kg in Lauterbach ($p < 0,001$) sowie 56,8 g/kg in Klein Rheide ($p < 0,001$). Die detaillierten Ergebnisse der linearen gemischten Modelle sind in Tabelle A25 und Tabelle A26 zusammengefasst. Die Ergebnisse der Tukey-korrigierten paarweisen Vergleiche befinden sich in Tabelle A27.

Auch für den Rohfasergehalt wurden signifikante Effekte der Position ($p < 0,001$) sowie des Solarparks ($p < 0,001$) nachgewiesen, während die Interaktion zwischen beiden Faktoren nicht signifikant war. Die Tukey-Tests ergaben innerhalb aller drei Solarparks deutliche Unterschiede zwischen der Position shade und mehreren der übrigen Positionen. In Gottesgabe wurde die größte Mittelwertsdifferenz zwischen gap und shade mit 50,4 g/kg festgestellt ($p = 0,007$). In Lauterbach zeigte sich der größte Unterschied zwischen free und shade (77,4 g/kg; $p < 0,001$). In Klein Rheide wurde der größten Unterschiede zwischen shade und edge (57,3 g/kg; $p = 0,001$) festgestellt.

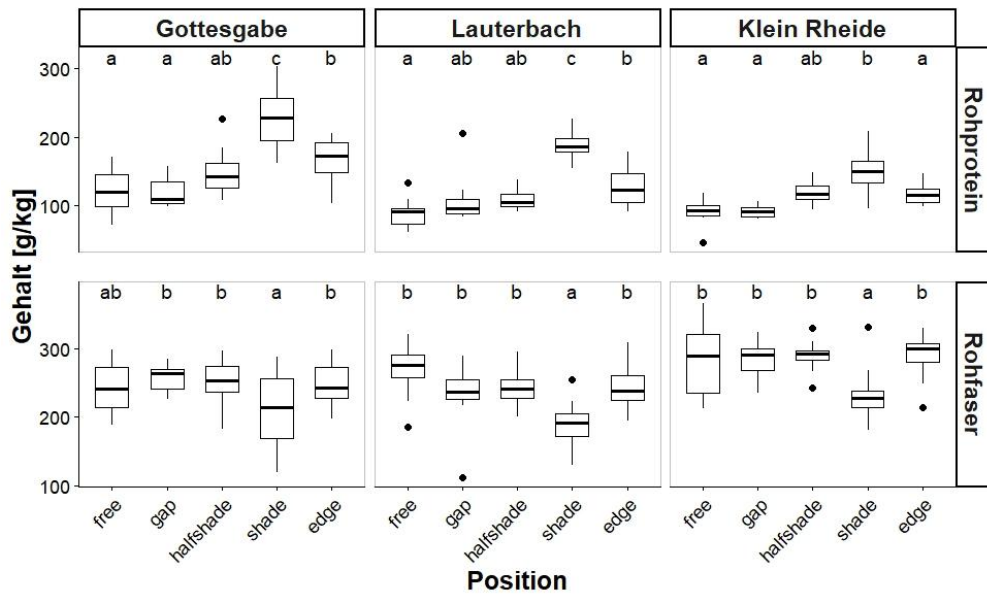


Abbildung 12: Boxplots der Rohprotein- und Rohfasergehalte des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von Position und Solarpark. Die Boxen zeigen den Median, das 1. und 3. Quartil sowie die Spannweite; Punkte kennzeichnen Ausreißer. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks (Tukey-Test, $p < 0,05$).

Für den ADF-Gehalt zeigte die Interaktion zwischen Position und Solarpark ($p = 0,035$) signifikante Effekte. Die Tukey-Tests ergaben insgesamt nur wenige deutliche Unterschiede zwischen den Positionen. In Gottesgabe unterschied sich die Position free von edge mit einer Mittelwertsdifferenz von 37,8 g/kg ($p = 0,018$). Für Lauterbach wurden keine Unterschiede zwischen den Positionen festgestellt. In Klein Rheide wurden Unterschiede zwischen free und shade (39,6 g/kg; $p = 0,012$), halfshade und shade (35,9 g/kg; $p = 0,028$) sowie shade und edge (33,8 g/kg; $p = 0,046$) nachgewiesen.

Für den NDF-Gehalt wurden signifikante Effekte der Interaktion zwischen beiden Faktoren ($p = 0,001$) nachgewiesen. Im Solarpark Gottesgabe konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Positionen festgestellt werden. In Lauterbach wurde die größte Mittelwertsdifferenz zwischen free und shade mit 107,2 g/kg ermittelt ($p < 0,001$). In Klein Rheide wurden der größte Unterschied zwischen shade und edge (112,4 g/kg; $p < 0,001$) beobachtet.

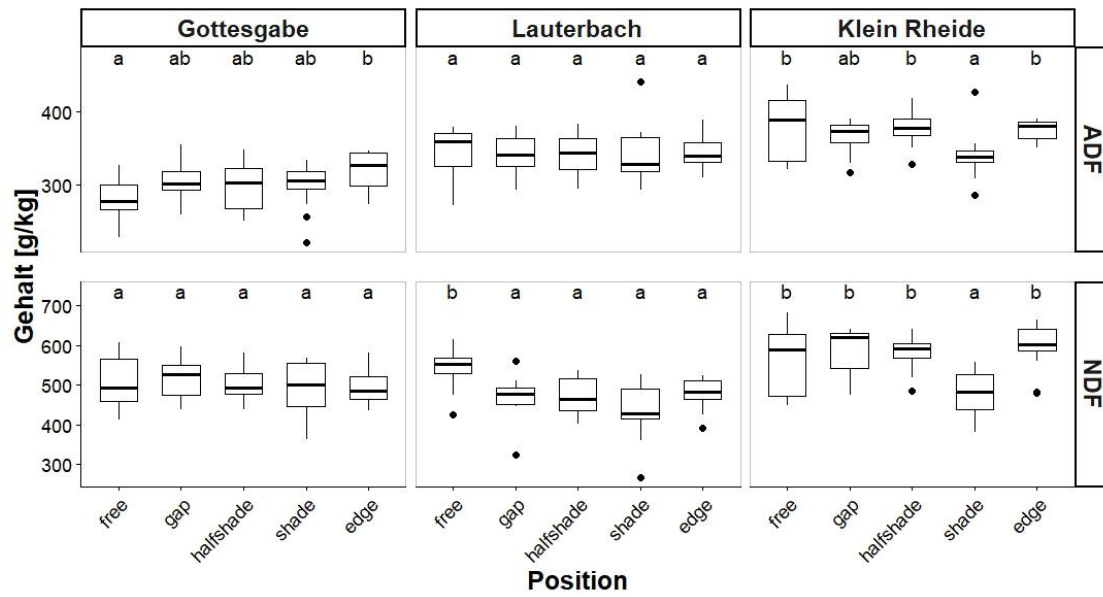


Abbildung 13: Boxplots der ADF- und NDF-Gehalte des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von Position und Solarpark. Die Boxen zeigen den Median, das 1. und 3. Quartil sowie die Spannweite; Punkte kennzeichnen Ausreißer. Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Positionen innerhalb eines Solarparks (Tukey-Test, $p < 0,05$).

4. Diskussion

4.1. Biodiversität

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen, dass FFPV-Anlagen kleinräumige Unterschiede innerhalb der Anlagen schaffen und dadurch die Biodiversität des Grünlandaufwuchses nicht einheitlich beeinflussen. Dabei reagieren die verschiedenen Komponenten der Biodiversität unterschiedlich auf die durch die PV-Module veränderten Standortbedingungen. Die Ergebnisse der Artenzusammensetzung, Diversitätsmaße sowie des Artenspektrums fielen sehr standortabhängig aus. Gleichzeitig verdeutlichen die Ergebnisse, dass sich die Auswirkungen der Modulbeschattung nicht auf eine einfache Zu- oder Abnahme der Biodiversität reduzieren lassen. Vielmehr sind sie als Ergebnis des Zusammenspiels von mikroklimatischen Veränderungen, Standortbedingungen, Vegetationsentwicklung und Flächenmanagement zu verstehen (Armstrong et al. 2026; Lüdemann 2025; Schwarz und Ziv 2025; Vervloesem et al. 2022). Die Bedeutung dieser Kontextabhängigkeit wird inzwischen auch im internationalen Forschungsstand hervorgehoben. So ordnet Lüdemann (2025) neben der technischen Ausgestaltung und dem Management auch die Umgebung und die Vornutzung einer Fläche als relevante Einflussfaktoren für die Biodiversitätsentwicklung von FFPV-Anlagen ein. Dies verdeutlicht, dass die Auswirkungen einer PV-Anlage nicht unabhängig von den jeweiligen Standortbedingungen betrachtet werden können, sondern auch davon abhängen, in welchem räumlichen und naturschutzfachlichen Kontext eine Anlage errichtet wird.

Die Ergebnisse unterstützen diese Vermutung, da für die drei Solarparks unterschiedliche Ergebnisse festgestellt wurden. Dies spricht dafür, dass die Modulbeschattung zwar einen wesentlichen Umweltfaktor darstellt, ihre Wirkung jedoch durch die jeweiligen Standortbedingungen überlagert wird. Die Untersuchungsflächen unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Bodeneigenschaften, ihrer Flächenvorgeschichte sowie ihrer Vegetationsentwicklung. Während GG auf nährstoffarmen Sandböden errichtet wurde, entstand LB auf ehemaligem Ackerland mit regionaler Ansaat und KR auf einer ehemaligen Kiesabbaufäche. Diese Unterschiede beeinflussen Wasserhaushalt, Nährstoffverfügbarkeit und Konkurrenzverhältnisse bereits unabhängig von der FFPV-Anlage und bestimmen damit die Ausgangsbedingungen, unter denen sich die Vegetation entwickelt (Bauke et al. 2022; Chung et al. 2023; Long et al. 2023). Die durch die PV-Module verursachten Veränderungen der Licht- und Feuchteverhältnisse (Armstrong et al. 2026) wirken folglich nicht auf identische Ökosysteme, sondern auf Pflanzengemeinschaften mit unterschiedlichen Standortbedingungen. Dieses Ergebnis wird auch durch die Ergebnisse der Artenzusammensetzung gestützt. Die drei untersuchten Solarparks unterscheiden sich deutlich in ihrer Artenzusammensetzung, sodass die jeweiligen Positionen innerhalb der Anlagen nur geringe Ähnlichkeiten aufweisen. In der NMDS-Ordination zeigen LB und KR keine Überschneidungen, während GG lediglich geringe Überschneidungen mit den beiden anderen

Solarparks aufweist. Dieses Muster wird auch durch die Venn-Diagramme bestätigt. Zwar weisen alle drei Solarparks eine vergleichbare Anzahl an Arten auf, die an allen Positionen innerhalb der jeweiligen Anlage vorkommen, jedoch handelt es sich dabei nicht um dieselben Arten. Darüber hinaus unterscheidet sich auch die Verteilung der übrigen Arten auf die einzelnen Positionen zwischen den Anlagen. Jedoch zeigt sich in den Venn-Diagrammen, dass mit Ausnahme von gap in Lauterbach und halfshade in Klein Rheide alle untersuchten Positionen eigene Arten aufweisen, die ausschließlich an der jeweiligen Position vorkommen. Dies deutet darauf hin, dass die unterschiedlichen Positionen innerhalb der Solarparks jeweils spezifische Bedingungen bieten können, unter denen bestimmte Arten vorkommen, die an den anderen Positionen desselben Solarparks nicht nachgewiesen wurden. Damit können die unterschiedlichen Positionen auch das Artenspektrum innerhalb eines Solarparks beeinflussen. Dies steht im Einklang mit den Ergebnissen von (Li et al. 2023), die zeigten, dass sich die Zusammensetzung von Pflanzengemeinschaften zwischen beschatteten und nicht beschatteten Bereichen innerhalb eines Solarparks signifikant unterscheidet. Ein ähnliches Muster wurde auch von Bienvenu et al. (2025) beobachtet. In ihrer Untersuchung von 20 Solarparks kamen ebenfalls an allen drei untersuchten Positionen Arten ausschließlich an der jeweiligen Position vor. Der Anteil dieser Arten lag außerhalb der Module bei 15–30 %, zwischen den Modulreihen bei 6–11 % und unter den Modulen bei 8–17 %. Dies zeigt, dass die verschiedenen Positionen bzw. Mikrohabitate innerhalb eines Solarparks jeweils zum Vorkommen unterschiedlicher Arten beitragen können.

Für die Species Richness ist kein einheitliches Muster zwischen den Solarparks erkennbar. Auffällig ist jedoch, dass LB an allen Positionen tendenziell eine geringere Artenzahl aufweist. Dies könnte unter anderem auf die standortspezifische Bewirtschaftung zurückzuführen sein. LB wurde als einziger Solarpark mit regionalem Saatgut eingesät und das Mahdgut verbleibt im Gegensatz zu KR nach der Mahd auf der Fläche. Diese Unterschiede im Flächenmanagement können die Entwicklung der Vegetation und damit auch die Artenzusammensetzung beeinflussen (Järviö et al. 2026).

Neben den Standortbedingungen dürfte auch das Alter der Anlagen zur Variabilität der Ergebnisse beigetragen haben, da die drei untersuchten Solarparks zwischen 2015 und 2022 errichtet wurden. Nach der Errichtung einer FFPV-Anlage entwickelt sich die Vegetation nicht unmittelbar zu einem stabilen Grünlandbestand, sondern durchläuft einen mehrjährigen Sukzessionsprozess (Zaplata 2025). In den ersten Jahren dominieren häufig Ruderalarten oder eingesäte Arten, während sich ausdauernde Grünlandarten erst mit zunehmender Entwicklungsdauer etablieren (Slodowicz et al. 2023; Klaus et al. 2018). Es konnten bereits Unterschiede in der Vegetation aufgrund des Alters des Solarparks festgestellt werden (Wu et al. 2025). Da sich die drei untersuchten Solarparks in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befinden, ist anzunehmen, dass auch dieser Faktor zu den beobachteten Unterschieden beigetragen hat. Schwarz und Ziv (2025) weisen darauf hin, dass die durch PV-Anlagen

hervorgerufenen Veränderungen des Mikroklimas sowie die Reaktionen der Vegetation keine Zustände darstellen, sondern sich je nach Prozess vorübergehend oder dauerhaft ausprägen können. Vor diesem Hintergrund ist anzunehmen, dass auch die Standzeit einer Anlage die Vegetationsentwicklung beeinflussen könnte. Da die vorliegende Untersuchung Solarparks unterschiedlichen Alters vergleicht, kann nicht ausgeschlossen werden, dass ein Teil der beobachteten Unterschiede auf verschiedene Entwicklungsstadien der Vegetation zurückzuführen ist (Schwarz und Ziv 2025).

Die vorliegenden Ergebnisse sprechen dagegen, dass die Modulbeschattung einen einheitlichen Einfluss auf die Biodiversität innerhalb der untersuchten Anlagen ausübt. Entsprechend lässt sich keine allgemeingültige Aussage darüber treffen, welche Position die Biodiversität am stärksten fördert oder nicht. Vielmehr schaffen FFPV-Anlagen ein Mosaik kleinräumig heterogener Standortbedingungen, das durch Variationen der Licht-, Temperatur- und Feuchteverhältnisse gekennzeichnet ist (Armstrong et al. 2026; Schwarz und Ziv 2025; Yavari Bajehbaj et al. 2024). Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Vegetation auf diese kleinräumigen Umweltgradienten reagiert, deren Ausprägung wiederum von den jeweiligen Standortbedingungen abhängt. Die Biodiversitätsmuster innerhalb von FFPV-Anlagen sind daher als Ergebnis dieser standortspezifischen Wechselwirkungen zu verstehen und nicht als unmittelbare Folge der Modulbeschattung allein.

4.2. Ellenberg-Zeigerwerte

Die Ellenberg-Zeigerwerte wurden verwendet, um zu untersuchen, ob sich die Standortbedingungen zwischen unterschiedlich stark von den PV-Modulen beeinflussten Positionen unterscheiden. Allerdings zeigten sich für alle drei Zeigerwerte standortabhängige Muster, was auf einen starken Einfluss der jeweiligen Standortbedingungen schließen lässt.

PV-Module reduzieren die auf den Boden treffende Strahlung und erzeugen dadurch kleinräumige Lichtgradienten innerhalb der Anlage. Während Bereiche außerhalb der Modulen (free) vollständig der Sonneneinstrahlung ausgesetzt sind, weisen insbesondere die Bereiche direkt unter den Modulen (shade) die geringste PAR auf (Schwarz und Ziv 2025). Armstrong et al. (2016) stellten 92 % geringere PAR unter den Modulen in ihrer Studie. Zwischen den Modulreihen sowie an den Modulrändern entstehen Übergangsbereiche mit zeitlich wechselnder Beschattung (Li et al. 2025).

Vor diesem Hintergrund war zu erwarten, dass die Ellenberg-Lichtwerte an der Position shade die niedrigsten und an der Position free die höchsten Werte aufweisen. Dieses Muster wurde teilweise bestätigt. In GG und KR wurden die niedrigsten geschätzten Randmittel an der Position shade ermittelt, wo vermutlich die geringste PAR vorhanden ist. Gleichzeitig wies GG insgesamt die höchsten Ellenberg-Lichtwerte auf. Dies stimmt mit den meteorologischen Bedingungen überein, da GG im

Zeitraum der zwölf Monate vor der Probenahme die höchste Sonnenscheindauer aufwies, während KR die geringste Sonnenscheindauer verzeichnete. Der signifikante Parkeffekt spiegelt somit die unterschiedlichen klimatischen Ausgangsbedingungen der Untersuchungsstandorte wider.

Abweichend von der Erwartung zeigte LB jedoch die niedrigsten Lichtwerte an der Position free. Dieses Ergebnis lässt sich nicht durch die Modulbeschattung erklären. Wahrscheinlich überlagern standortspezifische Faktoren den Einfluss der Lichtverfügbarkeit. Die Vegetationszusammensetzung wird neben der Einstrahlung unter anderem durch Bodeneigenschaften, Wasserverfügbarkeit, und Bewirtschaftung beeinflusst (MICHAUD et al. 2012). Ellenberg-Zeigerwerte beschreiben die Standortansprüche der vorkommenden Pflanzenarten und dienen als indirekte Hinweise auf die Standortbedingungen. Sie spiegeln daher nicht die zum Zeitpunkt der Vegetationsaufnahme gemessene Lichtintensität wider, sondern die Umweltbedingungen, unter denen sich die Vegetation über einen längeren Zeitraum entwickelt hat (Bartelheimer und Poschlod 2016; Möckel et al. 2016). Daher können auch auf unbeschatteten Flächen Pflanzenarten vorkommen, die nach ihren Ellenberg-Zeigerwerten geringere Lichtansprüche besitzen, wenn andere Standortfaktoren ihre Etablierung begünstigen.

Neben der Lichtverfügbarkeit verändern PV-Anlagen auch den Wasserhaushalt. Die Module fangen Niederschlag ab und leiten ihn an ihre Unterkanten weiter. Gleichzeitig verringert die Beschattung die Verdunstung. Dadurch entstehen innerhalb einer Anlage Unterschiede der Bodenfeuchte (Adeh et al. 2019; Barron-Gafford et al. 2019; Moscatelli et al. 2022; Sturchio et al. 2022). Besonders an den Modulkanten können durch den „Dripline-Effekt“ erhöhte Bodenfeuchten auftreten, während andere Bereiche unter den Modulen teilweise trockener bleiben (Yavari Bajehbaj et al. 2024).

Der signifikante Parkeffekt stimmt mit den meteorologischen Bedingungen überein. KR wies im Jahr vor der Probenahme den höchsten Niederschlag auf, während GG die geringsten Niederschlagsmengen verzeichnete. Tatsächlich wurden in GG die niedrigsten geschätzten Randmittel für Feuchte ermittelt.

Zwischen den Positionen ergaben sich jedoch keine einheitlichen Muster. In GG und KR unterschieden sich die Positionen nur geringfügig, während in LB deutlich stärkere Unterschiede beobachtet wurden. Jedoch wurde in allen Solarparks die geringste Ellenberg-Zeigerwerte für Feuchte auf der Freifläche festgestellt. Dort wird der Niederschlag nicht durch PV-Module abgehalten, aber durch die Sonneneinstrahlung ist die Verdunstung am höchsten (Saul 1997). Die Unterschiede in LB können ähnlich wie die abweichenden Ellenberg-Lichtwerte erklärt werden. Ellenberg-Zeigerwerte geben anhand der vorkommenden Pflanzenarten Hinweise auf die Standortbedingungen und bilden nicht die zum Zeitpunkt der Vegetationsaufnahme herrschenden Umweltbedingungen ab. Stattdessen spiegeln

sie die Standortverhältnisse wider, unter denen sich die Vegetation über einen längeren Zeitraum entwickelt hat. Daher müssen Unterschiede der Ellenberg-Feuchtwerte nicht zwangsläufig mit den aktuell vorherrschenden Bodenfeuchteverhältnissen übereinstimmen (Bartelheimer und Poschlod 2016; Möckel et al. 2016).

Für die Ellenberg-Stickstoffwerte wurde eine signifikante Interaktion zwischen Position und Solarpark festgestellt. Auffällig war, dass in allen drei Solarparks die höchsten geschätzten Randmittel an der Position shade und die niedrigsten Werte überwiegend an der Position free auftraten. Diese Ähnlichkeit deutet darauf hin, dass die durch die PV-Module geschaffenen Standortbedingungen die Etablierung stickstoffliebender Pflanzenarten begünstigen könnten. Carvalho et al. (2025) stellten in ihrer Studie einen erhöhten Stickstoffwert unter dem Modul fest. Dieser betrug 30,5 % mehr als zwischen den Modulen. Die Autoren vermuten, dass die verringerte Sonneneinstrahlung und die veränderten mikroklimatischen Bedingungen unter den PV-Modulen das Pflanzenwachstum sowie den Nährstoffkreislauf beeinflussen und dadurch zu höheren Gehalten an mineralischem Stickstoff beitragen könnten.

Direkte Auswirkungen von PV-Anlagen auf den Stickstoffhaushalt sind bislang nur in wenigen Studien untersucht worden. PV-Module verändern durch die Beschattung das Pflanzenwachstum und damit auch die Menge an ober- und unterirdischer Biomasse, die in den Boden eingetragen wird. Zusammen mit den durch die Module veränderten mikroklimatischen Bedingungen können dadurch Bodenprozesse und Nährstoffkreisläufe beeinflusst werden (Carvalho et al. 2025; Fiantis et al. 2026). Da Ellenberg-Stickstoffwerte jedoch ausschließlich die Standortpräferenzen der Vegetation widerspiegeln, erlauben sie keine direkten Aussagen über den tatsächlichen Stickstoffgehalt des Bodens. Hamidi et al. (2026) fanden in einer FFPV-Anlage unter den Modulen im Vergleich zu offenen Bereichen geringere Bodenstickstoffgehalte, gleichzeitig jedoch eine höhere Bodenfeuchte und niedrigere Bodentemperaturen. Die hier vorliegenden Ergebnisse, bei denen trotz der Beschattung höhere Ellenberg-Stickstoffwerte festgestellt wurden, könnten somit darauf hindeuten, dass die Zeigerwerte hier eine veränderte Artenzusammensetzung widerspiegeln und nicht die aktuelle Stickstoffverfügbarkeit des Bodens.

Darüber hinaus könnten Unterschiede der Flächenbewirtschaftung zu den beobachteten Mustern beigetragen haben. Eine Beweidung mit Schafen kann Stickstoff lokal über Kot und Urin verteilen (Cai und Akiyama 2017; Selbie et al. 2015). Der tatsächliche Umfang der Beweidung in den drei Solarparks ist unbekannt, sodass sich dessen Einfluss nicht beurteilen lässt. Der Solarpark LB wurde vor seiner Errichtung ackerbaulich genutzt und ist zugleich der jüngste der untersuchten Standorte. Es könnten Nachwirkungen der früheren Stickstoffdüngung zur heutigen Vegetationszusammensetzung beigetragen haben. Auswirkungen früherer Stickstoffdüngung auf die Artenzusammensetzung können

auch nach Beendigung der landwirtschaftlichen Nutzung noch über mehrere Jahre bestehen bleiben (Mountford et al. 1996; van Paassen et al. 2020). Ob ein solcher Effekt an diesem Standort tatsächlich vorliegt, kann anhand der vorliegenden Daten jedoch nicht geprüft werden.

Die Interpretation der Ergebnisse sollte unter Berücksichtigung der methodischen Einschränkungen erfolgen. Bei der Berechnung der Ellenberg-Zeigerwerte konnten mehrere Arten nicht berücksichtigt werden, da sie lediglich bis zur Gattungsebene bestimmt wurden und somit keine eindeutige Zuordnung der Zeigerwerte möglich war. Obwohl diese Arten überwiegend geringe Deckungsgrade aufwiesen, kann nicht ausgeschlossen werden, dass ihr Ausschluss die Auswertung beeinflusst hat.

Darüber hinaus wurden Nachweise von *Taraxacum spec.* und *Elymus spec.* aufgrund ihrer hohen Deckungsanteile den häufigsten Arten *Taraxacum officinale* beziehungsweise *Elymus repens* zugeordnet. Beide Gattungen umfassen jedoch Arten mit teilweise deutlich unterschiedlichen Ellenberg-Zeigerwerten. Beispielsweise weist *Elymus repens* einen Stickstoffwert von 7 auf, während *Elymus hispidus* mit einem Stickstoffwert von 3 deutlich nährstoffärmere Standorte bevorzugt. Auch innerhalb der Gattung *Taraxacum* bestehen erhebliche Unterschiede sowohl hinsichtlich der Feuchte- als auch der Stickstoffzeigerwerte. Eine abweichende Artzuordnung hätte daher insbesondere die Ergebnisse der Feuchte- und Stickstoffanalysen beeinflussen können.

Zusätzlich wurden Arten mit der Kennzeichnung „x“ bei den jeweiligen Ellenberg-Zeigerwerten ausgeschlossen. Diese Arten besitzen keine eindeutige ökologische Präferenz gegenüber dem betrachteten Standortfaktor und werden als indifferent bezeichnet. Ihr Ausschluss reduziert zwar die Unsicherheit der Zuordnung, verändert jedoch gleichzeitig die Gewichtung der verbleibenden Arten und könnte somit ebenfalls Einfluss auf die Auswertung gehabt haben.

Schließlich sollte berücksichtigt werden, dass Ellenberg-Zeigerwerte keine direkten Messgrößen der Umweltbedingungen darstellen, sondern die ökologischen Präferenzen der vorkommenden Pflanzenarten beschreiben. Die deckungsgradgewichteten Mittelwerte erlauben daher lediglich Rückschlüsse auf die langfristigen Standortverhältnisse und erfassen weder die tatsächliche Lichtintensität noch die Bodenfeuchte oder den Stickstoffgehalt zum Zeitpunkt der Untersuchung. Veränderungen der Zeigerwerte spiegeln in erster Linie Veränderungen der Artenzusammensetzung wider und können durch zahlreiche Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren beeinflusst werden. Für eine eindeutige Zuordnung der beobachteten Unterschiede zu den Auswirkungen der PV-Module wären ergänzende Messungen erforderlich. Die teilweise unterschiedlichen Muster zwischen den drei Solarparks verdeutlichen, dass sich aus den Ellenberg-Zeigerwerten zwar Hinweise auf kleinräumige Veränderungen der Standortbedingungen ableiten lassen, die zugrunde liegenden Ursachen jedoch nicht eindeutig identifiziert werden können. Insbesondere Unterschiede hinsichtlich

Bodeneigenschaften, Vornutzung, Bewirtschaftung und Anlagentyp können die Vegetationszusammensetzung beeinflussen (Armstrong et al. 2026; Lüdemann 2025; Schwarz und Ziv 2025; Vervloesem et al. 2022) und damit auch die Ellenberg-Zeigerwerte verändern.

4.3. Biomasse

In allen drei Solarparks wurde die geringste TM an der Position shade festgestellt. Dieses Ergebnis ist mit anderen Untersuchungen vergleichbar, die eine geringere Biomasse direkt unter den Modulen beobachteten. Armstrong et al. untersuchten Grünland in einer FFPV-Anlage in Großbritannien und berichteten ebenfalls eine bis zu vierfach höhere Biomasse in den unbedeckten Bereichen (Armstrong et al. 2016). Die geringere Biomasse unter den Modulen kann mit dem veränderten Mikroklima erklärt werden (WU et al. 2011; Zavaleta et al. 2003). PV-Module reduzieren die PAR und verändern gleichzeitig mikroklimatische Faktoren wie Boden- und Lufttemperatur sowie die Bodenfeuchte. Dadurch entstehen kleinräumig unterschiedliche Wachstumsbedingungen innerhalb einer Anlage (Vervloesem et al. 2022).

Auffällig ist jedoch, dass die höchsten TM nicht an allen Standorten auf der vollständig unbeschatteten Position (free) erreicht wurden. Während in GG die Position gap die höchste Biomasse aufwies, wurden in LB und KR die höchsten Werte an der Position edge festgestellt. Sturchio et al. stellten in ihrer Untersuchung fest, dass die oberirdische Biomasse nicht dort am höchsten ist, wo die größte Bodenfeuchte gemessen wurde. Stattdessen wurde die höchste Biomasse an Positionen beobachtet, die vormittags hohe Einstrahlung erhielten und nachmittags beschattet wurden. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die Biomasseproduktion nicht allein durch Licht oder Bodenfeuchte erklärt werden kann, sondern durch das Zusammenwirken beider Faktoren (Sturchio et al. 2022). Dies könnte die unterschiedlichen Ergebnisse der drei Solarparks erklären, da diese sich in unterschiedlichen Regionen befinden und somit verschiedenen meteorologischen Bedingungen ausgesetzt sind. Außerdem unterscheidet sich die Bauweise der Solarparks, sodass sich Licht- und Niederschlagsverhältnisse innerhalb der Anlagen unterschiedlich ausprägen können, was die Unterschiede der Biomasseproduktion zusätzlich erklären könnte.

Die Biomasse war in GG insgesamt am geringsten. Gleichzeitig fiel die Niederschlagsmenge in den zwölf Monaten vor der Probenahme dort deutlich geringer aus als in KR und LB. Die Wasserverfügbarkeit zählt zu den wesentlichen Einflussfaktoren für das Pflanzenwachstum, da sie unter anderem die Photosynthese, die Nährstoffaufnahme und die Zellstreckung beeinflusst. Entsprechend fördert eine höhere Wasserverfügbarkeit im Allgemeinen die Biomasseproduktion (Hossain und Beierkuhnlein 2018). Der vergleichsweise geringe Niederschlag in GG könnte daher zu

den niedrigeren Biomassewerten beigetragen haben. Gleichzeitig erklärt die Niederschlagsmenge die Ergebnisse vermutlich nicht vollständig. Trotz der höheren Niederschläge in KR wurden dort nicht an allen Positionen die höchsten Biomassemengen gemessen. Dies verdeutlicht, dass die Wasserverfügbarkeit zwar einen wesentlichen Einfluss auf das Pflanzenwachstum besitzt, ihre Wirkung innerhalb von PV-Anlagen jedoch durch andere Faktoren überlagert werden kann (Bacon et al. 2025).

Die vorliegende Arbeit berücksichtigt ausschließlich die oberirdische Trockenmasse. Aussagen über die Gesamtprimärproduktion oder mögliche Veränderungen der Wurzelbiomasse sind daher nicht möglich. Frühere Untersuchungen zeigen, dass sich ober- und unterirdische Biomasse unter veränderten Mikroklimabedingungen unterschiedlich entwickeln können (Liu et al. 2023).

Die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen den drei Solarparks entsprechen auch dem aktuellen Forschungsstand. Die aktuelle Übersichtsarbeit von Bacon et al. (2025) zu Grünland in PV-Anlagen fasst zahlreiche Feldstudien zusammen und zeigt, dass die Auswirkungen von PV-Anlagen auf die oberirdische Biomasse je nach Standort erheblich variieren. Die zusammengefassten Studien berichteten unter den Modulen sowohl Rückgänge der Biomasse von bis zu 77 % als auch Zunahmen von bis zu 90 %. Auch in den Bereichen zwischen den Modulreihen reichten die beobachteten Veränderungen von einer Abnahme um 37 % bis zu einer Zunahme um 18 % gegenüber unbeschatteten Kontrollflächen. Als Ursachen für diese große Variabilität nennen die Autoren unter anderem Unterschiede in den klimatischen Bedingungen, der Niederschlagsmenge, der Bauweise sowie der Bewirtschaftung der Flächen (Bacon et al. 2025). Die in der vorliegenden Arbeit beobachteten Unterschiede zwischen GG, LB und KR spiegeln diese standortabhängige Variabilität wider. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass die Biomasseproduktion innerhalb von FFPV-Anlagen von einem Zusammenspiel verschiedener Faktoren abhängt und die Auswirkungen der PV-Module stark standortabhängig sind.

4.4. Futterqualität

Die Futterqualität des Grünlandaufwuchses wurde durch die unterschiedlichen Positionen innerhalb der FFPV-Anlagen beeinflusst. Die deutlichsten Unterschiede zeigten sich in den einzelnen Futterqualitätsparametern, während die ME zwischen den Positionen weitgehend konstant blieb.

Der erhöhte Rohproteingehalt in der Position shade lässt sich mit den Ergebnissen der Ellenberg-Zeigerwerte in Beziehung setzen. In Kapitel 4.2. wurden für dieselbe Position ebenfalls höhere Ellenberg-Stickstoffwerte ermittelt. Beide Ergebnisse weisen darauf hin, dass sich unter den PV-Modulen Pflanzenbestände entwickeln, die nährstoffreichere Standortbedingungen anzeigen. Dabei ist jedoch zu berücksichtigen, dass Ellenberg-Stickstoffwerte keine direkten Aussagen über den

gemessenen Stickstoffgehalt des Bodens zulassen. Sie spiegeln vielmehr die ökologische Präferenz der Vegetation für Standorte mit hoher Nährstoffverfügbarkeit beziehungsweise Produktivität wider. Ein direkter kausaler Zusammenhang zwischen Ellenberg-Stickstoffwerten und Rohproteingehalt kann daher aus den vorliegenden Daten nicht abgeleitet werden, die übereinstimmenden Muster sprechen jedoch für eine vergleichbare Reaktion der Vegetation auf die veränderten Standortbedingungen.

Gleichzeitig deuten die geringeren Gehalte an Rohfaser, ADF und NDF in der Position shade darauf hin, dass der Aufwuchs unter den Modulen einen geringeren Anteil struktureller Zellwandbestandteile aufwies. Rohfaser, ADF und NDF gelten als Indikatoren für den Anteil von Cellulose, Hemicellulose und Lignin im Pflanzengewebe und nehmen im Verlauf der Pflanzenentwicklung typischerweise zu (Lemaire und Belanger 2020; Villalba et al. 2021). Die Kombination aus erhöhtem Rohproteingehalt und gleichzeitig geringeren Fasergehalten spricht daher für einen geringeren physiologischen Reifegrad des Aufwuchses in den stärker beschatteten Bereichen. Eine mögliche Ursache ist die durch die PV-Module reduzierte Einstrahlung, die die morphologische Entwicklung des Aufwuchses verlangsamen und die Bestände länger in einem vegetativen Entwicklungsstadium halten kann. Dies geht typischerweise mit einem geringeren Anteil struktureller Zellwandbestandteile sowie höheren Stickstoff- bzw. Rohproteinkonzentrationen einher (Lee 2018; Lin et al. 2001; Pang et al. 2019).

(Zinken et al. 2024) beobachteten auf Moorgrünland unter FFPV-Modulen ebenfalls Veränderungen der Futterqualität. In den stärker beschatteten Bereichen wurden höhere Rohproteingehalte festgestellt und führten dies auf die veränderten Umweltbedingungen zurück. Veränderte Mikroklimabedingungen unter den Modulen konnten bereits nachgewiesen werden (Armstrong et al. 2016), welche vermutlich die Vegetation und somit auch die Futterqualität beeinflussen können. Neben den Positionseffekten dürften auch die unterschiedlichen Standortbedingungen der drei Solarparks zur Variation der Futterqualität beigetragen haben. Die Anlagen unterschieden sich hinsichtlich Alter, Vornutzung, Bodeneigenschaften und Bewirtschaftung, wodurch sowohl die Artenzusammensetzung als auch das Mikroklima beeinflusst werden. Neuere Untersuchungen zeigen, dass FFPV-Anlagen Unterschiede in Bodenfeuchte und Temperatur verursachen, deren Ausprägung jedoch stark von den jeweiligen Positionen in einem Solarpark abhängt (Hamidi et al. 2026). Entsprechend können auch die Auswirkungen auf die Futterqualität zwischen verschiedenen Anlagen variieren.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass die durch FFPV-Anlagen hervorgerufene Beschattung die Zusammensetzung des Aufwuchses beeinflusst. Die Kombination aus höheren Rohproteingehalten sowie geringeren Rohfaser-, ADF- und NDF-Gehalten in der Position Shade spricht für einen weniger weit entwickelten Pflanzenbestand mit geringerem Zellwandaufbau. Gleichzeitig blieb die ME über alle Positionen hinweg weitgehend konstant. Damit deuten die Ergebnisse darauf hin, dass FFPV-Anlagen zwar einzelne Qualitätsparameter des Grünlandaufwuchses verändern können, die ME jedoch unter

den untersuchten Bedingungen insgesamt erhalten bleibt. Aufgrund der bislang noch sehr begrenzten Zahl an Studien zur Futterqualität unter FFPV-Anlagen sollten diese Zusammenhänge künftig an weiteren Standorten und über mehrere Vegetationsperioden untersucht werden.

5. Limitation

Bei der Interpretation der Ergebnisse sind verschiedene methodische Aspekte der Untersuchung zu berücksichtigen. Ein Aspekt betrifft die Berechnung der Ellenberg-Zeigerwerte. Einige Pflanzen konnten nur bis auf Gattungsniveau bestimmt werden und wurden daher von der Berechnung ausgeschlossen. *Taraxacum spec.* und *Elymus spec.* wurden aufgrund ihrer hohen Deckungsanteile den Referenzarten *Taraxacum officinale* bzw. *Elymus repens* zugeordnet. Da sich Arten innerhalb einer Gattung hinsichtlich ihrer Zeigerwerte unterscheiden können, kann diese Zuordnung die Ergebnisse beeinflusst haben. Eine möglichst vollständige Bestimmung bis auf Artebene würde daher eine präzisere Berechnung ermöglichen.

Eine weitere Besonderheit ergibt sich aus dem unterschiedlichen Zeitpunkt der Probenahmen. Diese erfolgten in den drei Solarparks im Mai, Juni und Juli 2025 und damit innerhalb eines Zeitraums von drei Monaten. Insbesondere für die Biomasse ist dadurch eine eingeschränkte Vergleichbarkeit möglich, da sich die Vegetation in unterschiedlichen Entwicklungsstadien befand. Wiederholte Probenahmen über mehrere Jahreszeiten und Jahre könnten diese Schwankungen besser abbilden. Darüber hinaus wären Untersuchungen verschiedener Lebenszyklusphasen der PV-Anlagen, einschließlich der Bauphase, sinnvoll, um auch längerfristige Auswirkungen zu erfassen.

Die Vergleichbarkeit der drei Solarparks wird zudem durch Unterschiede in der Bewirtschaftungsform, der Flächennutzung vor Errichtung der Anlagen und dem Alter der Anlagen beeinflusst. Diese Faktoren können die Vegetationszusammensetzung und Biomasse unabhängig von der Beschattung durch die PV-Module beeinflussen und lassen sich im vorliegenden Untersuchungsdesign nicht vollständig voneinander trennen.

Für die Interpretation der Ergebnisse wären zudem Messungen der PAR, der Bodenfeuchte und der Bodentemperatur hilfreich gewesen. Die Ursachen der unterschiedlichen Ergebnisse können bisher nur vermutet werden. Durch zusätzliche Messungen könnten die Ursachen besser abgeklärt werden.

6. Fazit

Die Ergebnisse zeigen, dass die Biodiversität des Grünlandaufwuchses durch die Position innerhalb der Solarparks beeinflusst wird, jedoch kein einheitlicher Zusammenhang mit zunehmender Beschattung besteht. Sowohl Artenzusammensetzung, Diversitätsmaße als auch Artenspektrum unterschieden sich zwischen den Positionen, wobei die Ausprägung der Effekte zwischen den Solarparks variierte. Die Forschungsfrage nach einer Veränderung der Biodiversität kann somit bejaht werden, wobei die Ergebnisse auf eine deutliche Standortabhängigkeit hinweisen. Auch die Ellenberg-Zeigerwerte veränderten sich in Abhängigkeit von der Position. Insbesondere die Lichtzeigerwerte waren in stärker beschatteten Bereichen niedriger, während die Feuchtezeiger je nach Solarpark unterschiedliche Muster zeigten. Damit weisen die Ergebnisse auf veränderte Standortbedingungen unter dem Einfluss der PV-Module hin, erlauben jedoch keine direkten Rückschlüsse auf die tatsächlichen Bodenverhältnisse.

Die Biomasseproduktion wurde durch die Beschattung deutlich beeinflusst. In allen drei Solarparks wurde die geringste oberirdische Trockenmasse in den schattigen Bereichen unter den Modulen festgestellt, während die Position mit der höchsten Biomasse zwischen den Solarparks variierte. Die Forschungsfrage zur Biomasseproduktion ist damit zu bejahen, wobei auch hier standortspezifische Unterschiede eine wesentliche Rolle spielen. Hinsichtlich der Futterqualität zeigten sich ebenfalls deutliche Positionseffekte. Der Aufwuchs in den schattigen Bereichen wies höhere Rohproteingehalte sowie geringere Rohfaser-, ADF- und NDF-Gehalte auf, während die metabolisierbare Energie weitgehend unverändert blieb. Die Forschungsfrage zur Futterqualität ist somit ebenfalls zu bejahen.

Vor dem Hintergrund des weiteren Ausbaus erneuerbarer Energien gewinnt die Mehrfachnutzung von Flächen durch PV und Grünland zunehmend an Bedeutung und macht weiteren Forschungsbedarf zu den ökologischen und landwirtschaftlichen Auswirkungen erforderlich. Gleichzeitig bietet die gezielte Planung von FFPV-Anlagen auf Flächen mit geringer Ausgangsbiodiversität die Chance, den Ausbau erneuerbarer Energien mit einer ökologischen Aufwertung der Flächen zu verbinden.

Literaturverzeichnis

- Adeh, Elnaz H.; Good, Stephen P.; Calaf, M.; Higgins, Chad W. (2019): Solar PV Power Potential is Greatest Over Croplands. In: *Scientific reports* 9 (1), S. 11442. DOI: 10.1038/s41598-019-47803-3.
- Ahmed, Shoaib; Ali, Amjad; Ahmed Ansari, Jamshed; Abdul Qadir, Sikandar; Kumar, Laveet (2025): A Comprehensive Review of Solar Photovoltaic Systems: Scope, Technologies, Applications, Progress, Challenges, and Recommendations. In: *IEEE Access* 13, S. 69723–69750. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3558539.
- Al-Ezzi, Athil S.; Ansari, Mohamed Nainar M. (2022): Photovoltaic Solar Cells: A Review. In: *ASI* 5 (4), S. 67. DOI: 10.3390/asi5040067.
- Armstrong, Alona; Ostle, Nicholas J.; Whitaker, Jeanette (2016): Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. In: *Environ. Res. Lett.* 11 (7), S. 74016. DOI: 10.1088/1748-9326/11/7/074016.
- Armstrong, Tom; Loughran, Caleb L.; Ennen, Joshua R.; Wild, Kristoffer H.; Nordberg, Eric J. (2026): A mosaic of microclimates: biodiversity outcomes and wildlife habitat potential in large-scale solar facilities. In: *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society*. DOI: 10.1002/brv.70171.
- Bacon, T.; Monlezun, A. C.; Hong, M.; Macknick, J.; Vries, N. de; Edwards-Callaway, L.; Paustian, K. (2025): Agrivoltaic Grazing Systems for a Sustainable Future: A Multi-Disciplinary Review & Gap Analysis. In: *Earth's Future* 13 (8), Artikel e2024EF005429. DOI: 10.1029/2024EF005429.
- Barron-Gafford, Greg A.; Pavao-Zuckerman, Mitchell A.; Minor, Rebecca L.; Sutter, Leland F.; Barnett-Moreno, Isaiah; Blackett, Daniel T. et al. (2019): Agrivoltaics provide mutual benefits across the food–energy–water nexus in drylands. In: *Nat Sustain* 2 (9), S. 848–855. DOI: 10.1038/s41893-019-0364-5.
- Bartelheimer, Maik; Poschlod, Peter (2016): Functional characterizations of Ellenberg indicator values – a review on ecophysiological determinants. In: *Functional Ecology* 30 (4), S. 506–516. DOI: 10.1111/1365-2435.12531.
- Bauke, Sara L.; Amelung, Wulf; Bol, Roland; Brandt, Luise; Brüggemann, Nicolas; Kandeler, Ellen et al. (2022): Soil water status shapes nutrient cycling in agroecosystems from micrometer to landscape scales. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 185 (6), S. 773–792. DOI: 10.1002/jpln.202200357.
- Bienvenu, Louison; Lec'hvien, Arnaud; Gros, Raphaël; Kebaili, Elise; Schatz, Bertrand; Bischoff, Armin; Isselin-Nondedeu, Francis (2026): Effects of solar panels and park management on plant functional traits and ecological groups. In: *Global Ecology and Conservation* 69, e04304. DOI: 10.1016/j.gecco.2026.e04304.
- Bienvenu, Louison; Lec'hvien, Arnaud; Gros, Raphaël; Kebaili, Elise; Schatz, Bertrand; Bischoff, Armin; Isselin-Nondedeu, Francis (2025): Effects of Panels and Management on Plant Community Composition in Southern French Solar Parks. In: *Applied Vegetation Science* 28 (3), Artikel e70037. DOI: 10.1111/avsc.70037.
- BMWK (Hg.) (2023): Photovoltaik-Strategie. Handlungsfelder und Maßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der Photovoltaik. Online verfügbar unter https://www.bundeswirtschaftsministerium.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/photovoltaik-strategie-2023.pdf?__blob=publicationFile, zuletzt geprüft am 20.07.2026.
- Böhm, Jonas; Witte, Thomas de (2025): Solarstrom vom Feld: Eine effiziente Nutzung der Fläche mit geringen Flächennutzungskonflikten. Projectbrief. Thünen-Institut für Betriebswirtschaft.

- Cai, Yanjiang; Akiyama, Hiroko (2017): Effects of inhibitors and biochar on nitrous oxide emissions, nitrate leaching, and plant nitrogen uptake from urine patches of grazing animals on grasslands: a meta-analysis. In: *Soil Science and Plant Nutrition* 63 (4), S. 405–414. DOI: 10.1080/00380768.2017.1367627.
- Cardinale, Bradley J.; Duffy, J. Emmett; Gonzalez, Andrew; Hooper, David U.; Perrings, Charles; Venail, Patrick et al. (2012): Biodiversity loss and its impact on humanity. In: *Nature* 486 (7401), S. 59–67. DOI: 10.1038/nature11148.
- Carvalho, Fabio; Montag, Hannah; Bentley, Laura; Šarlej, Radim; Broyd, Rosanne C.; Blaydes, Hollie et al. (2025): Plant and soil responses to ground-mounted solar panels in temperate agricultural systems. In: *Environ. Res. Lett.* 20 (2), S. 24003. DOI: 10.1088/1748-9326/ada45b.
- Chung, Y. Anny; Ke, Po-Ju; Adler, Peter B. (2023): Mechanistic approaches to investigate soil microbe-mediated plant competition. In: *Journal of Ecology* 111 (8), S. 1590–1597. DOI: 10.1111/1365-2745.14156.
- Curioni, Maddalena; Galli, Nikolas; Manzolini, Giampaolo; Rulli, Maria Cristina (2025): Global Land-Water Competition and Synergy Between Solar Energy and Agriculture. In: *Earth's Future* 13 (2), Artikel e2024EF005291. DOI: 10.1029/2024EF005291.
- Dondini, M.; Martin, M.; Camillis, C. de; Uwizeye, A.; Soussana, J.-F.; Robinson, T.; Steinfeld, H. (2023): Global assessment of soil carbon in grasslands – From current stock estimates to sequestration potential. Rome (FAO Animal Production and Health Paper, 187).
- Dünzen, Kaya; Krieger, Susanne; Ritter, David (2024): Photovoltaik-Freiflächenanlagen in Deutschland. Überblicksstudie. Öko-Institut e.V. Online verfügbar unter https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/PVFFA_Ueberblicksstudie.pdf, zuletzt geprüft am 20.07.2026.
- EEG (2023): Erneuerbare-Energien-Gesetz vom 21. Juli 2014 (BGBl. I S. 1066), das zuletzt durch Artikel 23 des Gesetzes vom 18. Dezember 2025 (BGBl. 2025 I Nr. 347) geändert worden ist.
- Elsässer, M.; Engel, S.; Thumm, U. (2013): Nachsaat von Leguminosen zur Steigerung der Eiweißerträge vom Grünland. Hg. v. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- EnBW: Solarpark Gottesgabe. Online verfügbar unter <https://www.enbw.com/unternehmen/themen/solarenergie/solarpark-gottesgabe/>, zuletzt geprüft am 25.06.2026.
- Fiantis, Dian; Ginting, Frisa Irawan; Chahyahunna, Affan; Panuju, Dyah Retno; Trisasongko, Bambang; Sabrina, Tengku et al. (2026): Impacts of agrivoltaic systems on soil properties and pedogenesis: A review. In: Bd. 196: Elsevier (Advances in Agronomy), S. 1–33.
- Gerster; Losand; Kampf; Krieg (2025): Leitfaden zur Berechnung der Energiekonzentration von Einzel- und Mischfuttermitteln für die Schweine- und Wieder-käuerfütterung. Hg. v. DLG e.V. (DLG-Merkblatt 503). Online verfügbar unter https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/Merkblaetter/dlg-merkblatt_503.pdf, zuletzt geprüft am 30.07.2026.
- Gómez-Catasús, Julia; Morales, Manuel B.; Giral, David; Del Portillo, David González; Manzano-Rubio, Robert; Solé-Bujalance, Laura et al. (2024): Solar photovoltaic energy development and biodiversity conservation: Current knowledge and research gaps. In: *Conservation Letters*. 17 (4), Artikel e13025. DOI: 10.1111/conl.13025.
- Günnewig, Dieter; Johannwerner, Esther; Kelm, Tobias; Metzger, Jochen; Wegner, Nils; Moog, Caroline; Kamm, Johanna (2022): Umweltverträgliche Standortsteuerung von Solar-Freiflächenanlagen.

Abschlussbericht. Hg. v. Umweltbundesamt. Online verfügbar unter <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>, zuletzt geprüft am 31.07.2026.

- Hamidi, D.; Baumann, K.; Kayser, M.; Siede, C.; Rethmeyer, F.; Hütt, C. et al. (2026): Sun, shade and soil: A case study on how free-field photovoltaic systems alter microclimate and soil (EGF Challenges and innovations for grassland resilience, 31, S. 327-330).
- Härdtle, Werner (2024): Biodiversität, Ökosystemfunktionen und Naturschutz. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Hassan, Nazim; Wang, Zhengwen (2024): Paralleled grazing and mowing differentially affected plant community diversity and productivity in a semi-arid grassland. In: *Ecol Process* 13 (1). DOI: 10.1186/s13717-024-00543-3.
- Heinz, Sabine; Kuhn, Gisbert; Mayer, Franziska (2016): Artenreiches Grünland – Lebensraum für Pflanzen und Tiere. Hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz.
- Hopkins, A.; Holz, B. (2006): Grassland for agriculture and nature conservation: production, quality and multi-functionality. In: *Agronomy Research* (4), S. 3–20.
- Hossain, Md Lokman; Beierkuhnlein, Carl (2018): Enhanced aboveground biomass by increased precipitation in a central European grassland. In: *Ecol Process* 7 (1). DOI: 10.1186/s13717-018-0149-1.
- IPBES (2019): Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Unter Mitarbeit von Eduardo Brondizio, Sandra Diaz, Josef Settele und Hien T. Ngo.
- Isselstein, J.; Jeangros, B.; Pavlu, V. (2005): Agronomic aspects of biodiversity targeted management of temperate grasslands in Europe - A review. In: *Agronomy Research* (3), S. 139–151.
- Järviö, Natasha; Uusitalo, Ville; Leppäkoski, Lauri; Breyer, Christian; Sahin, Hasret; Kosonen, Antti (2026): Known and unknown biodiversity impacts of solar PV: A review of life cycle stages and mitigation opportunities. In: *Applied Energy* 417, S. 128008. DOI: 10.1016/j.apenergy.2026.128008.
- Klaus, Valentin H.; Bloor, Juliette M. G.; Cozzi, Giulio; Le Clec’h, Solen; Peter, Sophie; Huguenin-Elie, Olivier (2025): Balancing Competing Grassland Ecosystem Services Requires Intensive Stakeholder Involvement and Actions on Different Spatial Scales. In: *Grass and Forage Science* 80 (1), Artikel e12709. DOI: 10.1111/gfs.12709.
- Klaus, Valentin H.; Hoefer, Christina J.; Fischer, Markus; Hamer, Ute; Kleinebecker, Till; Mertens, Désirée et al. (2018): Contribution of the soil seed bank to the restoration of temperate grasslands by mechanical sward disturbance. In: *Restoration Ecology* 26 (S2). DOI: 10.1111/rec.12626.
- Lafitte, Alix; Sordello, Romain; Ouédraogo, Dakis-Yaoba; Thierry, Chloé; Marx, Geoffroy; Froidevaux, Jérémy et al. (2023): Existing evidence on the effects of photovoltaic panels on biodiversity: a systematic map with critical appraisal of study validity. In: *Environmental evidence* 12 (1), S. 25. DOI: 10.1186/s13750-023-00318-x.
- Lambert, Quentin; Bischoff, Armin; Enea, Morgane; Gros, Raphael (2023): Photovoltaic power stations: an opportunity to promote European semi-natural grasslands? In: *Front. Environ. Sci.* 11, Artikel 1137845. DOI: 10.3389/fenvs.2023.1137845.
- Lee, Hoesung; Calvin, Katherine; Dasgupta, Dipak; Krinner, Gerhard; Mukherji, Aditi; Thorne, Peter W. et al. (2023): IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

- Lee, Mark A. (2018): A global comparison of the nutritive values of forage plants grown in contrasting environments. In: *Journal of plant research* 131 (4), S. 641–654. DOI: 10.1007/s10265-018-1024-y.
- Lemaire, Gilles; Belanger, Gilles (2020): Allometries in Plants as Drivers of Forage Nutritive Value: A Review. In: *Agriculture* 10 (1), S. 5. DOI: 10.3390/agriculture10010005.
- Li, Cui; Liu, Jinxian; Bao, Jiabing; Wu, Tiehang; Chai, Baofeng (2023): Effect of Light Heterogeneity Caused by Photovoltaic Panels on the Plant–Soil–Microbial System in Solar Park. In: *Land* 12 (2), S. 367. DOI: 10.3390/land12020367.
- Li, Yudi; Armstrong, Alona; Simmons, Christopher; Krasner, Noah Z.; Hernandez, Rebecca R. (2025): Ecological impacts of single-axis photovoltaic solar energy with periodic mowing on microclimate and vegetation. In: *Front. Sustain.* 6, Artikel 1497256. DOI: 10.3389/frsus.2025.1497256.
- Lin, C. H.; McGraw, M. L.; George, M. F.; Garrett, H. E. (2001): Nutritive quality and morphological development under partial shade of some forage species with agroforestry potential. In: *Agroforestry Systems* 53 (3), S. 269–281. DOI: 10.1023/A:1013323409839.
- Liu, Ziyu; Peng, Tong; Ma, Shaolan; Qi, Chang; Song, Yanfang; Zhang, Chuanji et al. (2023): Potential benefits and risks of solar photovoltaic power plants on arid and semi-arid ecosystems: an assessment of soil microbial and plant communities. In: *Frontiers in microbiology* 14, S. 1190650. DOI: 10.3389/fmicb.2023.1190650.
- Long, Jonathan R. de; Heinen, Robin; Heinze, Johannes; Morriën, Elly; Png, G. Kenny; Sapsford, Sarah J. et al. (2023): Plant-soil feedback: incorporating untested influential drivers and reconciling terminology. In: *Plant Soil*. DOI: 10.1007/s11104-023-05908-9.
- Losand; Pries; A. Menke; Tholen; Gruber; Hertwig et al. (2007): Schätzung des Energiegehaltes in Grasprodukten – Bericht zum Stand neuer Ableitungen. In: *Tagungsband der 51. Jahrestagung der AGGF*, S. 108–112.
- Lüdemann, Julia (2025): Biodiversitätsentwicklung in Freiflächen-Photovoltaikanlagen – Einflussfaktoren und Wechselwirkungen nutzbar machen? Hg. v. Naturschutz in Praxis und Forschung. ECOLOG-Institut für sozial-ökologische Forschung.
- Mayer, Jürgen (2003): Biodiversitätsforschung als Zukunftsdisziplin : Ein Beitrag der Biologiedidaktik. 19-41 Seiten / Zeitschrift für Didaktik der Biologie (ZDB) - Biologie Lehren und Lernen, Bd. 5 (1996). DOI: 10.4119/zdb-1729.
- Melts, Indrek; Heinsoo, Katrin; Ivask, Mari (2014): Herbage production and chemical characteristics for bioenergy production by plant functional groups from semi-natural grasslands. In: *Biomass and Bioenergy* 67, S. 160–166. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.04.037.
- Meyer, Kirmer; Temperton; Twerski; Schmidt; Patra-Duse; Laschke et al. (2025): Grünland kann was! Und was können wir für Grünland tun?
- MICHAUD, A.; Plantureux, S.; AMIAUD, B.; Carrère, P.; CRUZ, P.; DURU, M. et al. (2012): Identification of the environmental factors which drive the botanical and functional composition of permanent grasslands. In: *J. Agric. Sci.* 150 (2), S. 219–236. DOI: 10.1017/S0021859611000530.
- Möckel, Thomas; Löfgren, Oskar; Prentice, Honor C.; Eklundh, Lars; Hall, Karin (2016): Airborne hyperspectral data predict Ellenberg indicator values for nutrient and moisture availability in dry grazed grasslands within a local agricultural landscape. In: *Ecological Indicators* 66, S. 503–516. DOI: 10.1016/j.ecolind.2016.01.049.

- Moscatelli, Maria Cristina; Marabottini, Rosita; Massaccesi, Luisa; Marinari, Sara (2022): Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area. In: *Geoderma Regional* 29, e00500. DOI: 10.1016/j.geodrs.2022.e00500.
- Mountford, J. O.; Lakhani, K. H.; Holland, R. J. (1996): Reversion of vegetation following the cessation of fertilizer application. In: *Journal of vegetation science : official organ of the International Association for Vegetation Science* 7 (2), S. 219–228. DOI: 10.2307/3236322.
- Muluneh, Melese Genete (2021): Impact of climate change on biodiversity and food security: a global perspective—a review article. In: *Agric & Food Secur* 10 (1). DOI: 10.1186/s40066-021-00318-5.
- Pang, Kejia; van Sambeek, J. W.; Navarrete-Tindall, Nadia E.; Lin, Chung-Ho; Jose, Shibu; Garrett, H. E. (2019): Responses of legumes and grasses to non-, moderate, and dense shade in Missouri, USA. II. Forage quality and its species-level plasticity. In: *Agroforestry Systems* 93 (1), S. 25–38. DOI: 10.1007/s10457-017-0068-7.
- Pirhofer-Walzl, K.; Sørengaard, K.; Høgh-Jensen, H.; Eriksen, J.; Sanderson, M. A.; Rasmussen, J. (2011): Forage herbs improve mineral composition of grassland herbage. In: *Grass and Forage Science* 66 (3), S. 415–423. DOI: 10.1111/j.1365-2494.2011.00799.x.
- Plantureux, S.; Peeters, A.; McCracken, D. (2005): Biodiversity in intensive grasslands: Effect of management, improvement and challenges. In: *Agronomy Research* (3), S. 153–164.
- Rosenthal, Sonja; Pertagnol, Joachim; Beithan, Stefanie; Günnewig, Dieter; Peters, Wolfgang; Wern, Bernhard; Bundesamt für Naturschutz (2024): Photovoltaik-Freiflächenanlagen: Deutschland / Bundesamt für Naturschutz.
- Saul, A. J. (1997): Hydraulic Assessment. In: *Sewers*: Elsevier, S. 149–192.
- Schlegel, Jürgen (2021): Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt. Institut für Umwelt und Natürliche Ressourcen.
- Schwarz, Rachel; Ziv, Yaron (2025): Shedding light on biodiversity: reviewing existing knowledge and exploring hypothesised impacts of agrophotovoltaics. In: *Biological reviews of the Cambridge Philosophical Society* 100 (2), S. 855–870. DOI: 10.1111/brv.13165.
- Scognamiglio, Alessandra (2016): ‘Photovoltaic landscapes’: Design and assessment. A critical review for a new transdisciplinary design vision. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 55, S. 629–661. DOI: 10.1016/j.rser.2015.10.072.
- Selbie, Diana R.; Buckthought, Laura E.; Shepherd, Mark A. (2015): The Challenge of the Urine Patch for Managing Nitrogen in Grazed Pasture Systems. In: *Advances in Agronomy*, Bd. 129: Elsevier, S. 229–292.
- Siede, Caroline; Rethmeyer, Friederike; Wilms, Lisa; Zinken, Lars; Kunz, Franziska; Sutterlützi, Rahel et al. (2026): Short-term behavioural patterns of sheep under extensive solar grazing management with sun-tracking photovoltaic modules. In: *Livestock Science* 303, S. 105880. DOI: 10.1016/j.livsci.2025.105880.
- Slodowicz, Daniel; Durbecq, Aure; Ladouceur, Emma; Eschen, René; Humbert, Jean-Yves; Arlettaz, Raphaël (2023): The relative effectiveness of different grassland restoration methods: A systematic literature search and meta-analysis. In: *Ecol Sol and Evidence* 4 (2), Artikel e12221. DOI: 10.1002/2688-8319.12221.
- Sonne sammeln: Solarpark Gottesgabe. Online verfügbar unter <https://sonne-sammeln.de/solarparks/solarpark-gottesgabe/>, zuletzt geprüft am 25.06.2025.

- Sonne sammeln: Solarpark Klein Rheide. Online verfügbar unter <https://sonne-sammeln.de/solarparks/solarpark-klein-rheide/>, zuletzt geprüft am 03.07.2026.
- Sonne sammeln: Solarpark Lauterbach. Online verfügbar unter <https://sonne-sammeln.de/solarparks/solarpark-lauterbach/>, zuletzt geprüft am 03.07.2026.
- Sturchio, Matthew A.; Macknick, Jordan E.; Barron-Gafford, Greg A.; Chen, Anping; Alderfer, Cavin; Condon, Kathleen et al. (2022): Grassland productivity responds unexpectedly to dynamic light and soil water environments induced by photovoltaic arrays. In: *Ecosphere* 13 (12), Artikel e4334. DOI: 10.1002/ecs2.4334.
- Su, Jishuai; Zhao, Yujin; Xu, Fengwei; Bai, Yongfei (2022): Multiple global changes drive grassland productivity and stability: A meta-analysis. In: *Journal of Ecology* 110 (12), S. 2850–2869. DOI: 10.1111/1365-2745.13983.
- Tiainen, Juha; Hyvönen, Terho; Hagner, Marleena; Huusela-Veistola, Erja; Louhi, Paullina; Miettinen, Antti et al. (2020): Biodiversity in intensive and extensive grasslands in Finland: the impacts of spatial and temporal changes of agricultural land use. In: *AFSci* 29 (2). DOI: 10.23986/afsci.86811.
- Tichý, Lubomír; Axmanová, Irena; Dengler, Jürgen; Guarino, Riccardo; Jansen, Florian; Midolo, Gabriele et al. (2023): Ellenberg-type indicator values for European vascular plant species. In: *Journal of vegetation science : official organ of the International Association for Vegetation Science* 34 (1), Artikel e13168. DOI: 10.1111/jvs.13168.
- Treasure, L.; Sharp, S. P.; Smart, S. S.; Parker, G.; Armstrong, A. (2025): Global assessment of solar park impacts on ecosystem services. In: *Prog. Energy* 7 (3), S. 32002. DOI: 10.1088/2516-1083/addfa4.
- Uldrijan, Dan; Winkler, Jan; Vaverková, Magdalena Daria (2023): Bioindication of Environmental Conditions Using Solar Park Vegetation. In: *Environments* 10 (5), S. 86. DOI: 10.3390/environments10050086.
- Umweltbundesamt (2024): Photovoltaik. Online verfügbar unter <https://www.uba.de/n10453de>, zuletzt geprüft am 29.07.2026.
- Umweltbundesamt (2026): Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Online verfügbar unter <https://www.uba.de/n107415de>, zuletzt geprüft am 29.07.2026.
- van Paassen, José G.; Britton, Andrea J.; Mitchell, Ruth J.; Street, Lorna E.; Johnson, David; Coupar, Andrew; Woodin, Sarah J. (2020): Legacy effects of nitrogen and phosphorus additions on vegetation and carbon stocks of upland heaths. In: *The New phytologist* 228 (1), S. 226–237. DOI: 10.1111/nph.16671.
- Vervloesem, Jeffrey; Marcheggiani, Ernesto; Choudhury, M. Abdul MueedD; Muys, Bart (2022): Effects of Photovoltaic Solar Farms on Microclimate and Vegetation Diversity. In: *Sustainability* 14 (12), S. 7493. DOI: 10.3390/su14127493.
- Villalba, Juan J.; Ates, Serkan; MacAdam, Jennifer W. (2021): Non-fiber Carbohydrates in Forages and Their Influence on Beef Production Systems. In: *Front. Sustain. Food Syst.* 5, Artikel 566338. DOI: 10.3389/fsufs.2021.566338.
- Wang, Zhirong; Wang, Tongxin; Zhang, Xiujuan; Wang, Junbang; Yang, Yongsheng; Sun, Yu et al. (2024): Biodiversity conservation in the context of climate change: Facing challenges and management strategies. In: *The Science of the total environment* 937, S. 173377. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.173377.
- Wattmanufactur: BIODIV-PV-Klein Rheide. Online verfügbar unter <https://wattmanufactur.de/bio-div-pv.html>, zuletzt geprüft am 03.07.2026.

- WetterKontor: Monats- und Jahreswerte für Hoherodskopf (Vogelsberg, 743 m). Online verfügbar unter <https://www.wetterkontor.de/wetter-rueckblick/monats-und-jahreswerte.asp?id=3663&jr0=2024&jr1=2025&mo0=1&mo1=12>, zuletzt geprüft am 26.07.2026.
- WetterKontor: Wetterrückblick Müncheberg (Landkreis Märkisch-Oderland). Online verfügbar unter <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/rueckblick.asp?id=F475>, zuletzt geprüft am 26.07.2026.
- WetterKontor: Wetterrückblick Schleswig. Online verfügbar unter <https://www.wetterkontor.de/de/wetter/deutschland/rueckblick.asp?id=134>, zuletzt geprüft am 26.07.2026.
- Wilder Ecology (2025): Impacts of ground mounted solar farm/parks on biodiversity. Literature review. Hg. v. SWT Trading Ltd. – Wilder Ecology.
- Wirth, Harry (2026): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. Hg. v. Fraunhofer ISE. Online verfügbar unter <http://www.pv-fakten.de/>.
- Wittig, Rüdiger; Niekisch, Manfred (2014): Biodiversität. Grundlagen, Gefährdung, Schutz. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum. Online verfügbar unter http://cm1.abcatalog.net/center/cm/cm_cm.php?v3156=1609422811&v8312=lehmanns.de&flash=1&v7376=9783642546938.
- Wu, Chuandong; Liu, Hu; Wei, Lemin; Yu, Yang; Zhao, Wenzhi; Guo, Li et al. (2025): Diverse vegetation responses to solar farm installation are also driven by climate change. In: *Commun Earth Environ* 6 (1). DOI: 10.1038/s43247-025-02121-7.
- WU, ZHUOTING; DIJKSTRA, PAUL; KOCH, GEORGE W.; PEÑUELAS, JOSEP; HUNGATE, BRUCE A. (2011): Responses of terrestrial ecosystems to temperature and precipitation change: a meta-analysis of experimental manipulation. In: *Global Change Biology* 17 (2), S. 927–942. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02302.x.
- Yavari Bajehbaj, Rouhangiz; Cibir, Raj; Duncan, Jonathan M.; McPhillips, Lauren E. (2024): Quantifying soil moisture and evapotranspiration heterogeneity within a solar farm: Implications for stormwater management. In: *Journal of Hydrology* 638, S. 131474. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2024.131474.
- Yuan, Xiangning; Li, Sien; Chen, Jinliang; Yu, Haichao; Yang, Tianyi; Wang, Chunyu et al. (2024): Impacts of Global Climate Change on Agricultural Production: A Comprehensive Review. In: *Agronomy* 14 (7), S. 1360. DOI: 10.3390/agronomy14071360.
- Zaplata, Markus (2025): Management and sustainability of ground-mounted solar parks requires consideration of vegetation succession as an omnipresent process. In: *OE* 10, Artikel e141583. DOI: 10.3897/oneeco.10.e141583.
- Zavaleta, Erika S.; Shaw, M. Rebecca; Chiariello, Nona R.; Mooney, Harold A.; Field, Christopher B. (2003): Additive effects of simulated climate changes, elevated CO₂, and nitrogen deposition on grassland diversity. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 100 (13), S. 7650–7654. DOI: 10.1073/pnas.0932734100.
- Zinken, L.; Hamidi, D.; Tegtmeier, P.; Kayser, M.; Isselstein, J. (2024): Mikroklima, Graswachstum und Aufwuchsqualität von Moorgrasland unter freistehenden Photovoltaikmodulen. Hg. v. DHBW Ravensburg (Internationale Weidetagung - Weidehaltung auf Gunststandorten zukunftsfähig gestalten, S. 86-90).

Anhang

Statistische Analyse

Tabelle A7: Von der Berechnung der Ellenberg-Zeigerwerte ausgeschlossene Pflanzen und Gründe für den Ausschluss.

Grund	Ausgeschlossene Pflanzen
Keine eindeutige Artbestimmung	<i>Convolvulus spec.</i> , <i>Erigeron spec.</i> , <i>Festuca spec.</i> , <i>Papaver spec.</i> , <i>Melilotus spec.</i> , <i>Sonchus spec.</i> , <i>Epilobium spec.</i> , <i>Stellaria spec.</i> , <i>Crepis spec.</i> und <i>Medicago spec.</i> , <i>Bromus spec.</i> , <i>Anchusa spec.</i> , <i>Veronica spec.</i> , <i>Erodium spec.</i> , <i>Geranium spec.</i> , <i>Vivia spec.</i>
Keine eindeutige Zuordnung zur verwendeten Datenbank möglich	<i>Epilobium adnatum</i> , <i>Galium album</i> , <i>Poa angustifolia</i> , <i>Senecio jacobaea</i> , <i>Senecio vernalis</i> , <i>Vicia angustifolia</i>

Ergebnisse Biodiversität

Artenzusammensetzung

Tabelle A8: Ergebnisse der PERMANOVA zur Untersuchung der Artenzusammensetzung aller Vegetationsaufnahmen in Abhängigkeit von Position und Solarpark.

Effekt	df	Quadratsumme	R ²	F	p-Wert
Position x Park	8	7,721	0,100	3,393	0,001
Residuals	165	46,938	0,610		
Total	179	76,906	1		

Tabelle A9: Ergebnisse der PERMANOVA zur Untersuchung der Artenzusammensetzung zwischen den Positionen innerhalb der drei Solarparks.

Effekt	Park	df	Quadratsumme	R ²	F	p-Wert
Position x Park	GG	4	2,906	0,130	2,056	0,001
Residuals	GG	55	19,434	0,870		
Total	GG	59	22,340	1		
Position x Park	LB	4	5,540	0,332	6,833	0,001
Residuals	LB	55	11,147	0,668		
Total	LB	59	16,687	1		
Position x Park	KR	4	3,237	0,165	2,721	0,001
Residuals	KR	55	16,357	0,835		
Total	KR	59	19,594	1		

Tabelle A10: Ergebnisse der paarweisen PERMANOVA-Vergleiche der Artenzusammensetzung zwischen den Positionen innerhalb der drei Solarparks. Angegeben sind die Teststatistik, das Bestimmtheitsmaß, der p-Wert sowie der nach Bonferroni korrigierte p-Wert.

Park	Vergleich	F	R²	p-Wert	Bonferroni-adjustierter p-Wert
GG	free - gap	1,822	0,076	0,079	0,132
GG	free - halfshade	1,639	0,069	0,121	0,173
GG	free - shade	4,566	0,172	0,001	0,005
GG	free - edge	2,214	0,091	0,024	0,066
GG	gap - halfshade	0,381	0,017	0,949	0,949
GG	gap - shade	2,336	0,096	0,028	0,066
GG	gap - edge	0,873	0,038	0,563	0,626
GG	halfshade - shade	2,148	0,089	0,033	0,066
GG	halfshade - edge	0,860	0,038	0,555	0,626
GG	shade - edge	3,793	0,147	0,001	0,005
LB	free - gap	17,253	0,440	0,001	0,002
LB	free - halfshade	10,764	0,329	0,001	0,002
LB	free - shade	4,764	0,178	0,002	0,003
LB	free - edge	10,046	0,313	0,001	0,002
LB	gap - halfshade	0,438	0,020	0,689	0,766
LB	gap - shade	10,330	0,320	0,001	0,002
LB	gap - edge	1,046	0,045	0,349	0,436
LB	halfshade - shade	6,692	0,233	0,001	0,002
LB	halfshade - edge	0,352	0,016	0,854	0,854
LB	shade - edge	6,113	0,217	0,002	0,003
KR	free - gap	1,580	0,067	0,137	0,196
KR	free - halfshade	2,862	0,115	0,016	0,032
KR	free - shade	4,542	0,171	0,001	0,003
KR	free - edge	2,366	0,097	0,026	0,043
KR	gap - halfshade	0,958	0,042	0,452	0,502
KR	gap - shade	4,169	0,159	0,001	0,003
KR	gap - edge	0,401	0,018	0,874	0,874
KR	halfshade - shade	4,340	0,165	0,001	0,003
KR	halfshade - edge	1,275	0,055	0,245	0,306
KR	shade - edge	4,092	0,157	0,001	0,003

Tabelle A11: Ergebnisse der Betadisper-Analyse zur Prüfung der Homogenität der multivariaten Streuung innerhalb der drei Solarparks.

Park	df	Quadratsumme	Mittlere Quadratsumme	F	p-Wert
GG	4	0,005	0,001	0,095	0,990
LB	4	0,317	0,079	3,254	0,020
KR	4	0,044	0,011	1,004	0,422

Diversitätsmaße

Tabelle A12: Geschätzte marginale Mittelwerte (Estimated Marginal Means, EMMs) einschließlich Standardfehlern, Freiheitsgraden und 95 %-Konfidenzintervallen für Species Richness, Shannon-Index und Evenness.

Species Richness						
Position	Park	EMMs	Standard-fehler	df	Unteres 95%-Konfidenzintervall	Oberes 95%-Konfidenzintervall
free	GG	6,917	0,653	23,406	5,567	8,266
gap	GG	8,167	0,653	23,406	6,817	9,516
halfshade	GG	6,583	0,653	23,406	5,234	7,933
shade	GG	5,417	0,653	23,406	4,067	6,766
edge	GG	6,833	0,653	23,406	5,484	8,183
free	LB	5,500	0,653	23,406	4,150	6,850
gap	LB	3,417	0,653	23,406	2,067	4,766
halfshade	LB	4,167	0,653	23,406	2,817	5,516
shade	LB	4,833	0,653	23,406	3,484	6,183
edge	LB	4,583	0,653	23,406	3,234	5,933
free	KR	7,583	0,653	23,406	6,234	8,933
gap	KR	6,083	0,653	23,406	4,734	7,433
halfshade	KR	5,833	0,653	23,406	4,484	7,183
shade	KR	3,667	0,653	23,406	2,317	5,016
edge	KR	7,167	0,653	23,406	5,817	8,516
Shannon-Index						
Position	Park	EMM	Standard-fehler	df	Unteres 95%-Konfidenzintervall	Oberes 95%-Konfidenzintervall
free	GG	1,225	0,121	53,027	0,982	1,468
gap	GG	1,172	0,121	53,027	0,929	1,415
halfshade	GG	1,018	0,121	53,027	0,775	1,261
shade	GG	0,823	0,121	53,027	0,579	1,066
edge	GG	1,370	0,121	53,027	1,127	1,614
free	LB	1,159	0,121	53,027	0,915	1,402
gap	LB	0,638	0,121	53,027	0,395	0,881
halfshade	LB	0,762	0,121	53,027	0,518	1,005
shade	LB	1,027	0,121	53,027	0,783	1,270
edge	LB	0,856	0,121	53,027	0,613	1,099
free	KR	1,312	0,121	53,027	1,069	1,555
gap	KR	1,113	0,121	53,027	0,869	1,356

halfshade	KR	1,179	0,121	53,027	0,936	1,422
shade	KR	0,937	0,121	53,027	0,693	1,180
edge	KR	1,327	0,121	53,027	1,084	1,570
Evenness						
Position	Park	EMMs	Standard- fehler	df	Unteres 95%- Konfidenzintervall	Oberes 95%- Konfidenzintervall
free	GG	0,627	0,055	93,529	0,517	0,737
gap	GG	0,550	0,055	93,529	0,441	0,660
halfshade	GG	0,540	0,055	93,529	0,430	0,650
shade	GG	0,490	0,055	93,529	0,380	0,600
edge	GG	0,729	0,055	93,529	0,619	0,839
free	LB	0,693	0,055	93,529	0,584	0,803
gap	LB	0,562	0,055	93,529	0,452	0,672
halfshade	LB	0,563	0,055	93,529	0,453	0,672
shade	LB	0,678	0,055	93,529	0,569	0,788
edge	LB	0,574	0,055	93,529	0,464	0,683
free	KR	0,651	0,055	93,529	0,541	0,761
gap	KR	0,621	0,055	93,529	0,512	0,731
halfshade	KR	0,691	0,055	93,529	0,581	0,800
shade	KR	0,745	0,055	93,529	0,635	0,855
edge	KR	0,682	0,055	93,529	0,573	0,792

Tabelle A13: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche der geschätzten marginalen Mittelwerte (Tukey-Post-hoc-Test) für Species Richness, Shannon-Index und Evenness.

Species Richness						
Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standard- fehler	df	t-Wert	Tukey-adjustierter p- Wert
free - gap	GG	-1,250	0,732	159	-1,707	0,433
free - halfshade	GG	0,333	0,732	159	0,455	0,991
free - shade	GG	1,500	0,732	159	2,048	0,248
free - edge	GG	0,083	0,732	159	0,114	1,000
gap - halfshade	GG	1,583	0,732	159	2,162	0,200
gap - shade	GG	2,750	0,732	159	3,754	0,002
gap - edge	GG	1,333	0,732	159	1,820	0,366
halfshade - shade	GG	1,167	0,732	159	1,593	0,504
halfshade - edge	GG	-0,250	0,732	159	-0,341	0,997
shade - edge	GG	-1,417	0,732	159	-1,934	0,304
free - gap	LB	2,083	0,732	159	2,844	0,040
free - halfshade	LB	1,333	0,732	159	1,820	0,366
free - shade	LB	0,667	0,732	159	0,910	0,893
free - edge	LB	0,917	0,732	159	1,251	0,721
gap - halfshade	LB	-0,750	0,732	159	-1,024	0,844
gap - shade	LB	-1,417	0,732	159	-1,934	0,304
gap - edge	LB	-1,167	0,732	159	-1,593	0,504

halfshade - shade	LB	-0,667	0,732	159	-0,910	0,893
halfshade - edge	LB	-0,417	0,732	159	-0,569	0,979
shade - edge	LB	0,250	0,732	159	0,341	0,997
free - gap	KR	1,500	0,732	159	2,048	0,248
free - halfshade	KR	1,750	0,732	159	2,389	0,124
free - shade	KR	3,917	0,732	159	5,347	< 0,001
free - edge	KR	0,417	0,732	159	0,569	0,979
gap - halfshade	KR	0,250	0,732	159	0,341	0,997
gap - shade	KR	2,417	0,732	159	3,299	0,010
gap - edge	KR	-1,083	0,732	159	-1,479	0,578
halfshade - shade	KR	2,167	0,732	159	2,958	0,029
halfshade - edge	KR	-1,333	0,732	159	-1,820	0,366
shade - edge	KR	-3,500	0,732	159	-4,778	< 0,001
Shannon-Index						
Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standard-fehler	df	t-Wert	Tukey-adjustierter p-Wert
free - gap	GG	0,053	0,160	159	0,333	0,997
free - halfshade	GG	0,207	0,160	159	1,298	0,693
free - shade	GG	0,402	0,160	159	2,523	0,091
free - edge	GG	-0,145	0,160	159	-0,910	0,893
gap - halfshade	GG	0,154	0,160	159	0,964	0,871
gap - shade	GG	0,349	0,160	159	2,189	0,189
gap - edge	GG	-0,198	0,160	159	-1,243	0,726
halfshade - shade	GG	0,195	0,160	159	1,225	0,737
halfshade - edge	GG	-0,352	0,160	159	-2,208	0,182
shade - edge	GG	-0,548	0,160	159	-3,433	0,007
free - gap	LB	0,520	0,160	159	3,262	0,012
free - halfshade	LB	0,397	0,160	159	2,487	0,099
free - shade	LB	0,132	0,160	159	0,826	0,922
free - edge	LB	0,303	0,160	159	1,896	0,324
gap - halfshade	LB	-0,124	0,160	159	-0,775	0,937
gap - shade	LB	-0,389	0,160	159	-2,437	0,111
gap - edge	LB	-0,218	0,160	159	-1,366	0,650
halfshade - shade	LB	-0,265	0,160	159	-1,662	0,461
halfshade - edge	LB	-0,094	0,160	159	-0,591	0,976
shade - edge	LB	0,171	0,160	159	1,071	0,821
free - gap	KR	0,199	0,160	159	1,249	0,723
free - halfshade	KR	0,133	0,160	159	0,834	0,920
free - shade	KR	0,375	0,160	159	2,353	0,134
free - edge	KR	-0,015	0,160	159	-0,094	1,000
gap - halfshade	KR	-0,066	0,160	159	-0,415	0,994
gap - shade	KR	0,176	0,160	159	1,104	0,804
gap - edge	KR	-0,214	0,160	159	-1,342	0,665
halfshade - shade	KR	0,242	0,160	159	1,519	0,551

halfshade - edge	KR	-0,148	0,160	159	-0,927	0,886
shade - edge	KR	-0,390	0,160	159	-2,447	0,109
Evenness						
Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standard- fehler	df	t-Wert	Tukey-adjustierter p-Wert
free - gap	GG	0,077	0,078	159	0,982	0,863
free - halfshade	GG	0,087	0,078	159	1,112	0,800
free - shade	GG	0,137	0,078	159	1,750	0,406
free - edge	GG	-0,102	0,078	159	-1,302	0,691
gap - halfshade	GG	0,010	0,078	159	0,130	1,000
gap - shade	GG	0,060	0,078	159	0,769	0,939
gap - edge	GG	-0,179	0,078	159	-2,283	0,156
halfshade - shade	GG	0,050	0,078	159	0,639	0,968
halfshade - edge	GG	-0,189	0,078	159	-2,413	0,117
shade - edge	GG	-0,239	0,078	159	-3,052	0,022
free - gap	LB	0,131	0,078	159	1,680	0,449
free - halfshade	LB	0,131	0,078	159	1,675	0,452
free - shade	LB	0,015	0,078	159	0,193	1,000
free - edge	LB	0,120	0,078	159	1,532	0,543
gap - halfshade	LB	< 0,001	0,078	159	-0,006	1,000
gap - shade	LB	-0,116	0,078	159	-1,487	0,572
gap - edge	LB	-0,012	0,078	159	-0,148	1,000
halfshade - shade	LB	-0,116	0,078	159	-1,482	0,576
halfshade - edge	LB	-0,011	0,078	159	-0,143	1,000
shade - edge	LB	0,105	0,078	159	1,339	0,667
free - gap	KR	0,030	0,078	159	0,381	0,996
free - halfshade	KR	-0,040	0,078	159	-0,507	0,987
free - shade	KR	-0,094	0,078	159	-1,205	0,748
free - edge	KR	-0,031	0,078	159	-0,402	0,994
gap - halfshade	KR	-0,069	0,078	159	-0,888	0,901
gap - shade	KR	-0,124	0,078	159	-1,586	0,509
gap - edge	KR	-0,061	0,078	159	-0,782	0,935
halfshade - shade	KR	-0,055	0,078	159	-0,698	0,957
halfshade - edge	KR	0,008	0,078	159	0,106	1,000
shade - edge	KR	0,063	0,078	159	0,804	0,929

Tabelle A14: Gruppierung der Positionen auf Grundlage der Tukey-Post-hoc-Tests (Compact Letter Display, CLD) für Species Richness, Shannon-Index und Evenness.

Species Richness							
Position	Park	EMMs	Standard- fehler	df	Unteres 95%- Konfidenzintervall	Oberes 95%- Konfidenzintervall	Gruppe
shade	GG	5,417	0,653	23,406	3,592	7,241	a
halfshade	GG	6,583	0,653	23,406	4,759	8,408	ab
edge	GG	6,833	0,653	23,406	5,009	8,658	ab

free	GG	6,917	0,653	23,406	5,092	8,741	ab
gap	GG	8,167	0,653	23,406	6,342	9,991	b
gap	LB	3,417	0,653	23,406	1,592	5,241	a
halfshade	LB	4,167	0,653	23,406	2,342	5,991	ab
edge	LB	4,583	0,653	23,406	2,759	6,408	ab
shade	LB	4,833	0,653	23,406	3,009	6,658	ab
free	LB	5,500	0,653	23,406	3,675	7,325	b
shade	KR	3,667	0,653	23,406	1,842	5,491	a
halfshade	KR	5,833	0,653	23,406	4,009	7,658	b
gap	KR	6,083	0,653	23,406	4,259	7,908	b
edge	KR	7,167	0,653	23,406	5,342	8,991	b
free	KR	7,583	0,653	23,406	5,759	9,408	b
Shannon-Index							
Position	Park	Emms	Standard- fehler	df	Unteres 95%- Konfidenzintervall	Oberes 95%- Konfidenzintervall	Gruppe
shade	GG	0,823	0,121	53,027	0,499	1,146	a
halfshade	GG	1,018	0,121	53,027	0,695	1,341	ab
gap	GG	1,172	0,121	53,027	0,849	1,495	ab
free	GG	1,225	0,121	53,027	0,902	1,548	ab
edge	GG	1,370	0,121	53,027	1,047	1,694	b
gap	LB	0,638	0,121	53,027	0,315	0,961	a
halfshade	LB	0,762	0,121	53,027	0,439	1,085	ab
edge	LB	0,856	0,121	53,027	0,533	1,179	ab
shade	LB	1,027	0,121	53,027	0,704	1,350	ab
free	LB	1,159	0,121	53,027	0,835	1,482	b
shade	KR	0,937	0,121	53,027	0,613	1,260	a
gap	KR	1,113	0,121	53,027	0,790	1,436	a
halfshade	KR	1,179	0,121	53,027	0,856	1,502	a
free	KR	1,312	0,121	53,027	0,989	1,635	a
edge	KR	1,327	0,121	53,027	1,004	1,650	a
Evenness							
Position	Park	EMMs	Standard- fehler	df	Unteres 95%- Konfidenzintervall	Oberes 95%- Konfidenzintervall	Gruppe
shade	GG	0,490	0,055	93,529	0,345	0,635	a
halfshade	GG	0,540	0,055	93,529	0,395	0,685	ab
gap	GG	0,550	0,055	93,529	0,405	0,695	ab
free	GG	0,627	0,055	93,529	0,482	0,772	ab
edge	GG	0,729	0,055	93,529	0,584	0,874	b
gap	LB	0,562	0,055	93,529	0,417	0,707	a
halfshade	LB	0,563	0,055	93,529	0,418	0,707	a
edge	LB	0,574	0,055	93,529	0,429	0,719	a
shade	LB	0,678	0,055	93,529	0,533	0,823	a
free	LB	0,693	0,055	93,529	0,549	0,838	a
gap	KR	0,621	0,055	93,529	0,476	0,766	a
free	KR	0,651	0,055	93,529	0,506	0,796	a

edge	KR	0,682	0,055	93,529	0,537	0,827	a
halfshade	KR	0,691	0,055	93,529	0,546	0,836	a
shade	KR	0,745	0,055	93,529	0,600	0,890	a

Artenspektrum

Tabelle A15: Kombinationen der Positionen mit den zugehörigen Pflanzenarten im jeweiligen Solarpark.

GG		
Positionen	Anzahl Arten	Arten
free + gap + halfshade + edge	7	Achillea millefolium; Anthemis ruthenica; Bromus hordeaceus; Festuca ovina; Lactuca perennis; Silene latifolia; Veronica arvensis
halfshade	3	Agrostis stolonifera; Galium mollugo agg.; Stellaria media
free + halfshade + edge	3	Anchusa officinalis; Nardus stricta; Silene vulgaris
free + halfshade	1	Anthemis tinctoria
gap + halfshade + shade + edge	5	Anthriscus caucalis; Cirsium arvense; Convolvulus spec.; Myosotis stricta; Taraxacum officinale
free + gap + halfshade + shade + edge	5	Berteroa incana; Bromus sterilis; Bromus tectorum; Cerastium holosteoides; Rumex acetosella
shade + edge	1	Chenopodium album
free	5	Crepis capillaris; Dactylis glomerata; Hypochaeris radicata; Medicago lupulina; Vicia angustifolia
gap + halfshade + edge	2	Elymus repens; Rumex acetosa
free + shade + edge	1	Erigeron spec.
gap + halfshade + shade	1	Erodium cicutarium
edge	3	Festuca spec.; Lactuca serriola; Veronica hederifolia
free + gap + halfshade + shade	2	Geranium pusillum; Holcus lanatus
shade	1	Medicago spec.
gap	4	Papaver dubium; Poa angustifolia; Poa pratensis; Vicia cracca
gap + shade + edge	2	Papaver rhoeas; Stellaria spec.
free + gap + shade + edge	1	Papaver spec.
free + gap + shade	1	Potentilla collina
gap + shade	1	Rumex obtusifolius
gap + edge	1	Sisymbrium loeselii
LB		
Kombination	Anzahl Arten	Arten
free + gap + shade + edge	1	Alopecurus pratensis

shade	4	Atriplex patula; Geranium dissectum; Stellaria media; Urtica dioica
edge	2	Barbarea vulgaris; Dactylis glomerata
free + halfshade	1	Bromus erectus
free + gap + halfshade + edge	2	Bromus secalinus; Holcus lanatus
free + halfshade + shade + edge	1	Bromus sterilis
free + halfshade + shade	1	Calamagrostis epigejos
free + gap + halfshade + shade + edge	6	Cirsium arvense; Epilobium adnatum; Galium aparine; Poa trivialis; Taraxacum officinale; Vicia tetrasperma
free + gap + shade	1	Crepis biennis
free + shade	1	Daucus carota
gap + halfshade	1	Epilobium hirsutum
gap + halfshade + edge	1	Epilobium parviflorum
free + gap + edge	1	Epilobium spec.
halfshade + shade	2	Epilobium tetragonum; Galium album
shade + edge	3	Galium mollugo agg.; Lapsana communis; Veronica persica
free	3	Geranium pusillum; Plantago lanceolata; Vicia hirsuta
free + edge	1	Sonchus spec.
halfshade	1	Trisetum flavescens
KR		
Kombination	Anzahl Arten	Arten
free + gap + halfshade + edge	7	Achillea millefolium; Cerastium holosteoides; Crepis capillaris; Phleum pratense; Plantago lanceolata; Senecio jacobaea; Taraxacum officinale
free + gap + halfshade + shade + edge	5	Agrostis capillaris; Elymus repens; Festuca rubra; Holcus lanatus; Lolium perenne
halfshade + shade + edge	1	Bromus hordeaceus
edge	5	Campanula rotundifolia; Galium aparine; Rumex acetosa; Sonchus spec.; Vicia cracca
shade	5	Chenopodium album; Convolvulus arvensis; Crepis spec.; Lapsana communis; Melilotus spec.
shade + edge	1	Cirsium arvense
free	5	Crepis biennis; Medicago lupulina; Medicago sativa; Sanguisorba minor; Tussilago farfara
gap + halfshade + shade + edge	2	Dactylis glomerata; Epilobium ciliatum
free + edge	6	Daucus carota; Erigeron canadensis; Filago germanica; Geranium pusillum; Rumex acetosella; Stellaria graminea
halfshade + edge	2	Festuca ovina; Silene vulgaris
gap + halfshade	1	Galium mollugo agg.

free + gap + edge	3	Hypericum perforatum; Hypochaeris radicata; Trifolium repens
halfshade + shade	2	Prunella vulgaris; Urtica dioica
gap	1	Vicia hirsuta

Ergebnisse Ellenberg-Zeigerwerte

Tabelle A16: Ergebnisse der linearen gemischten Modelle für die Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff.

Parameter	Effekt	χ^2	df	p-Wert
Licht	Position	11,320	4	0,023
Licht	Park	6,525	2	0,038
Licht	Position x Park	14,500	8	0,070
Feuchte	Position	3,307	4	0,508
Feuchte	Park	29,400	2	< 0,001
Feuchte	Position x Park	74,316	8	< 0,001
Stickstoff	Position	38,024	4	< 0,001
Stickstoff	Park	17,621	2	< 0,001
Stickstoff	Position x Park	26,475	8	< 0,001

Tabelle A17: Geschätzte Randmittelwerte (Estimated Marginal Means, EMMs) der Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff nach Position und Park. Angegeben sind der geschätzte Randmittelwert, der Standardfehler, die Freiheitsgrade, das 95 %-Konfidenzintervall sowie die Signifikanzgruppen des Tukey-Post-hoc-Tests.

Licht							
Position	Park	EMMs	Standard- fehler	df	Unteres 95%- Konfidenz- intervall	Oberes 95%- Konfidenz- intervall	Gruppe
shade	GG	7,569	0,115	15,991	7,235	7,904	a
free	GG	7,692	0,115	15,991	7,358	8,027	ab
gap	GG	7,707	0,115	15,991	7,373	8,042	ab
halfshade	GG	7,760	0,115	15,991	7,425	8,094	ab
edge	GG	7,941	0,115	15,991	7,607	8,276	b
free	LB	7,282	0,115	15,991	6,947	7,616	a
shade	LB	7,319	0,115	15,991	6,984	7,653	a
gap	LB	7,331	0,115	15,991	6,997	7,666	a
edge	LB	7,348	0,115	15,991	7,014	7,683	a
halfshade	LB	7,354	0,115	15,991	7,019	7,688	a
shade	KR	6,988	0,115	15,991	6,654	7,323	a
halfshade	KR	7,358	0,115	15,991	7,023	7,692	b
gap	KR	7,410	0,115	15,991	7,076	7,744	b
edge	KR	7,417	0,115	15,991	7,082	7,751	b
free	KR	7,434	0,115	15,991	7,100	7,769	b
Feuchte							
Position	Park	EMMs	Standard- fehler	df	Unteres 95%- Konfidenz- intervall	Oberes 95%- Konfidenz- intervall	Gruppe
free	GG	3,541	0,163	19,399	3,201	3,881	a
gap	GG	3,566	0,163	19,399	3,226	3,906	a
halfshade	GG	3,566	0,163	19,399	3,226	3,906	a
edge	GG	3,729	0,163	19,399	3,389	4,069	a
shade	GG	3,784	0,163	19,399	3,444	4,124	a
free	LB	4,559	0,163	19,399	4,219	4,899	a

shade	LB	5,168	0,167	21,342	4,821	5,515	b
edge	LB	5,918	0,163	19,399	5,578	6,258	c
halfshade	LB	5,976	0,163	19,399	5,636	6,316	c
gap	LB	6,095	0,163	19,399	5,755	6,435	c
free	KR	4,673	0,163	19,399	4,333	5,013	a
edge	KR	4,896	0,163	19,399	4,556	5,236	ab
gap	KR	4,910	0,163	19,399	4,570	5,250	ab
halfshade	KR	4,991	0,163	19,399	4,651	5,331	ab
shade	KR	5,152	0,163	19,399	4,812	5,492	b
Stickstoff							
Position	Park	EMMs	Standardfehler	df	Unteres 95%-Konfidenzintervall	Oberes 95%-Konfidenzintervall	Gruppe
free	GG	3,408	0,461	8,476	1,893	4,923	a
edge	GG	4,521	0,461	8,476	3,006	6,036	b
halfshade	GG	4,628	0,461	8,476	3,113	6,143	b
gap	GG	4,823	0,461	8,476	3,308	6,338	b
shade	GG	5,042	0,461	8,476	3,527	6,557	b
free	LB	6,131	0,461	8,476	4,616	7,646	a
halfshade	LB	6,416	0,461	8,476	4,901	7,931	a
gap	LB	6,462	0,461	8,476	4,947	7,977	a
edge	LB	6,467	0,461	8,476	4,952	7,981	a
shade	LB	6,900	0,461	8,476	5,385	8,415	a
free	KR	4,546	0,461	8,476	3,031	6,061	a
edge	KR	5,022	0,461	8,476	3,507	6,537	a
gap	KR	5,248	0,461	8,476	3,733	6,763	a
halfshade	KR	6,160	0,461	8,476	4,645	7,674	b
shade	KR	6,523	0,461	8,476	5,008	8,038	b

Tabelle A18: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche (Tukey-Post-hoc-Test) der Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff zwischen den Positionen innerhalb der Parks. Angegeben sind die mittlere Differenz der geschätzten Randmittelwerte, der Standardfehler, die Freiheitsgrade, der t-Wert sowie der Tukey-adjustierte p-Wert.

Licht						
Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standardfehler	df	t-Wert	Tukey-adjustierter p-Wert
free - gap	GG	-0,015	0,114	159	-0,132	1,000
free - halfshade	GG	-0,067	0,114	159	-0,593	0,976
free - shade	GG	0,123	0,114	159	1,083	0,815
free - edge	GG	-0,249	0,114	159	-2,188	0,190
gap - halfshade	GG	-0,052	0,114	159	-0,461	0,991
gap - shade	GG	0,138	0,114	159	1,215	0,743
gap - edge	GG	-0,234	0,114	159	-2,056	0,245
halfshade - shade	GG	0,191	0,114	159	1,676	0,452

halfshade - edge	GG	-0,181	0,114	159	-1,595	0,503
shade - edge	GG	-0,372	0,114	159	-3,271	0,011
free - gap	LB	-0,049	0,114	159	-0,434	0,993
free - halfshade	LB	-0,072	0,114	159	-0,631	0,970
free - shade	LB	-0,037	0,114	159	-0,324	0,998
free - edge	LB	-0,066	0,114	159	-0,584	0,977
gap - halfshade	LB	-0,022	0,114	159	-0,198	1,000
gap - shade	LB	0,012	0,114	159	0,109	1,000
gap - edge	LB	-0,017	0,114	159	-0,150	1,000
halfshade - shade	LB	0,035	0,114	159	0,307	0,998
halfshade - edge	LB	0,005	0,114	159	0,047	1,000
shade - edge	LB	-0,030	0,114	159	-0,260	0,999
free - gap	KR	0,024	0,114	159	0,215	1,000
free - halfshade	KR	0,077	0,114	159	0,674	0,962
free - shade	KR	0,446	0,114	159	3,922	0,001
free - edge	KR	0,018	0,114	159	0,157	1,000
gap - halfshade	KR	0,052	0,114	159	0,459	0,991
gap - shade	KR	0,422	0,114	159	3,707	0,003
gap - edge	KR	-0,007	0,114	159	-0,058	1,000
halfshade - shade	KR	0,369	0,114	159	3,248	0,012
halfshade - edge	KR	-0,059	0,114	159	-0,517	0,986
shade - edge	KR	-0,428	0,114	159	-3,765	0,002
Feuchte						
Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standardfehler	df	t-Wert	Tukey-adjustierter p-Wert
free - gap	GG	-0,025	0,173	158,0	-0,147	1,000
free - halfshade	GG	-0,025	0,173	158,0	-0,147	1,000
free - shade	GG	-0,243	0,173	158,0	-1,407	0,624
free - edge	GG	-0,188	0,173	158,0	-1,091	0,811
gap - halfshade	GG	0,000	0,173	158,0	0,000	1,000
gap - shade	GG	-0,218	0,173	158,0	-1,260	0,716
gap - edge	GG	-0,163	0,173	158,0	-0,944	0,879
halfshade - shade	GG	-0,218	0,173	158,0	-1,260	0,716
halfshade - edge	GG	-0,163	0,173	158,0	-0,944	0,879
shade - edge	GG	0,055	0,173	158,0	0,316	0,998
free - gap	LB	-1,536	0,173	158,0	-8,889	< 0,001
free - halfshade	LB	-1,417	0,173	158,0	-8,198	< 0,001
free - shade	LB	-0,609	0,177	158,1	-3,441	0,007
free - edge	LB	-1,359	0,173	158,0	-7,861	< 0,001
gap - halfshade	LB	0,119	0,173	158,0	0,691	0,958
gap - shade	LB	0,928	0,177	158,1	5,246	< 0,001
gap - edge	LB	0,178	0,173	158,0	1,028	0,842
halfshade - shade	LB	0,808	0,177	158,1	4,570	< 0,001
halfshade - edge	LB	0,058	0,173	158,0	0,337	0,997
shade - edge	LB	-0,750	0,177	158,1	-4,241	< 0,001
free - gap	KR	-0,237	0,173	158,0	-1,372	0,646
free - halfshade	KR	-0,318	0,173	158,0	-1,841	0,354

free - shade	KR	-0,479	0,173	158,0	-2,770	0,049
free - edge	KR	-0,223	0,173	158,0	-1,290	0,698
gap - halfshade	KR	-0,081	0,173	158,0	-0,469	0,990
gap - shade	KR	-0,242	0,173	158,0	-1,398	0,630
gap - edge	KR	0,014	0,173	158,0	0,082	1,000
halfshade - shade	KR	-0,160	0,173	158,0	-0,929	0,885
halfshade - edge	KR	0,095	0,173	158,0	0,551	0,982
shade - edge	KR	0,256	0,173	158,0	1,480	0,577
Stickstoff						
Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standardfehler	df	t-Wert	Tukey-adjustierter p-Wert
free - gap	GG	-1,415	0,291	159	-4,868	< 0,001
free - halfshade	GG	-1,220	0,291	159	-4,197	< 0,001
free - shade	GG	-1,634	0,291	159	-5,622	< 0,001
free - edge	GG	-1,113	0,291	159	-3,831	0,002
gap - halfshade	GG	0,195	0,291	159	0,671	0,962
gap - shade	GG	-0,219	0,291	159	-0,754	0,943
gap - edge	GG	0,301	0,291	159	1,037	0,838
halfshade - shade	GG	-0,414	0,291	159	-1,425	0,612
halfshade - edge	GG	0,106	0,291	159	0,366	0,996
shade - edge	GG	0,521	0,291	159	1,791	0,382
free - gap	LB	-0,332	0,291	159	-1,141	0,784
free - halfshade	LB	-0,285	0,291	159	-0,982	0,863
free - shade	LB	-0,769	0,291	159	-2,646	0,067
free - edge	LB	-0,336	0,291	159	-1,155	0,777
gap - halfshade	LB	0,046	0,291	159	0,159	1,000
gap - shade	LB	-0,438	0,291	159	-1,505	0,561
gap - edge	LB	-0,004	0,291	159	-0,014	1,000
halfshade - shade	LB	-0,484	0,291	159	-1,665	0,459
halfshade - edge	LB	-0,050	0,291	159	-0,174	1,000
shade - edge	LB	0,433	0,291	159	1,491	0,570
free - gap	KR	-0,702	0,291	159	-2,415	0,117
free - halfshade	KR	-1,613	0,291	159	-5,551	< 0,001
free - shade	KR	-1,977	0,291	159	-6,802	< 0,001
free - edge	KR	-0,476	0,291	159	-1,638	0,475
gap - halfshade	KR	-0,911	0,291	159	-3,136	0,017
gap - shade	KR	-1,275	0,291	159	-4,387	< 0,001
gap - edge	KR	0,226	0,291	159	0,777	0,937
halfshade - shade	KR	-0,364	0,291	159	-1,252	0,721
halfshade - edge	KR	1,137	0,291	159	3,913	0,001
shade - edge	KR	1,501	0,291	159	5,164	< 0,001

Ergebnisse Biomasse

Tabelle A19: Deskriptive Statistik der TM des Grünlandaufwuchses in Abhängigkeit von Position und Solarpark.

Park	Position	Mittelwert	SD	Median	Minimum	Maximum
GG	free	22,649	14,446	21,705	6,38	56,91
GG	gap	55,228	29,927	46,055	14,32	107,55
GG	halfshade	42,930	22,470	40,230	13,60	78,68
GG	shade	13,528	13,102	8,135	1,42	37,59
GG	edge	29,870	25,126	21,690	3,46	92,61
LB	free	57,023	24,239	53,880	27,35	110,08
LB	gap	42,838	27,681	45,480	10,37	86,33
LB	halfshade	44,771	20,022	43,900	19,48	84,96
LB	shade	13,135	10,314	9,805	2,56	39,07
LB	edge	55,284	22,672	53,610	22,26	98,00
KR	free	54,086	19,102	54,780	26,76	100,00
KR	gap	57,297	28,690	57,815	13,71	105,12
KR	halfshade	47,538	17,550	50,305	14,22	70,13
KR	shade	16,970	7,469	19,420	3,50	25,77
KR	edge	51,815	23,475	59,940	15,58	83,36

Tabelle A20: Ergebnisse der paarweisen Vergleiche der TM zwischen den Positionen innerhalb der einzelnen Solarparks (Tukey-HSD-Post-hoc-Test auf Grundlage des linearen gemischten Modells).

Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standardfehler	df	t-Wert	Tukey-adjustierter p-Wert
free - gap	GG	-32,578	8,596	163	-3,790	0,002
free - halfshade	GG	-20,281	8,596	163	-2,359	0,132
free - shade	GG	9,121	8,596	163	1,061	0,826
free - edge	GG	-7,221	8,596	163	-0,840	0,918
gap - halfshade	GG	12,298	8,596	163	1,431	0,609
gap - shade	GG	41,699	8,596	163	4,851	0,000
gap - edge	GG	25,358	8,596	163	2,950	0,030
halfshade - shade	GG	29,402	8,596	163	3,420	0,007
halfshade - edge	GG	13,060	8,596	163	1,519	0,551
shade - edge	GG	-16,342	8,596	163	-1,901	0,321
free - gap	LB	14,186	8,596	163	1,650	0,468
free - halfshade	LB	12,253	8,596	163	1,425	0,612
free - shade	LB	43,888	8,596	163	5,106	0,000
free - edge	LB	1,739	8,596	163	0,202	1,000
gap - halfshade	LB	-1,933	8,596	163	-0,225	0,999
gap - shade	LB	29,703	8,596	163	3,455	0,006
gap - edge	LB	-12,447	8,596	163	-1,448	0,598

halfshade - shade	LB	31,636	8,596	163	3,680	0,003
halfshade - edge	LB	-10,513	8,596	163	-1,223	0,738
shade - edge	LB	-42,149	8,596	163	-4,903	0,000
free - gap	KR	-3,211	8,596	163	-0,374	0,996
free - halfshade	KR	6,548	8,596	163	0,762	0,941
free - shade	KR	37,116	8,596	163	4,318	0,000
free - edge	KR	2,271	8,596	163	0,264	0,999
gap - halfshade	KR	9,758	8,596	163	1,135	0,788
gap - shade	KR	40,327	8,596	163	4,691	0,000
gap - edge	KR	5,482	8,596	163	0,638	0,969
halfshade - shade	KR	30,568	8,596	163	3,556	0,004
halfshade - edge	KR	-4,277	8,596	163	-0,498	0,988
shade - edge	KR	-34,845	8,596	163	-4,054	0,001

Tabelle A21: Geschätzte Randmittel (Estimated Marginal Means, EMMs) der TM des Grünlandaufwuchses einschließlich Standardfehler, 95 %-Konfidenzintervall und Signifikanzgruppen für die einzelnen Positionen innerhalb der drei Solarparks.

Park	Position	EMMs	Standard- fehler	Unteres 95%- Konfidenz- intervall	Oberes 95%- Konfidenz- intervall	Gruppe
GG	shade	13,528	6,654	-4,526	31,583	a
GG	free	22,649	6,654	4,595	40,704	ab
GG	edge	29,870	6,654	11,815	47,925	ab
GG	halfshade	42,930	6,654	24,875	60,985	bc
GG	gap	55,228	6,654	37,173	73,282	c
LB	shade	13,135	6,654	-4,920	31,190	a
LB	gap	42,838	6,654	24,783	60,892	b
LB	halfshade	44,771	6,654	26,716	62,825	b
LB	edge	55,284	6,654	37,230	73,339	b
LB	free	57,023	6,654	38,969	75,078	b
KR	shade	16,970	6,654	-1,085	35,025	a
KR	halfshade	47,538	6,654	29,484	65,593	b
KR	edge	51,815	6,654	33,760	69,870	b
KR	free	54,086	6,654	36,031	72,140	b
KR	gap	57,297	6,654	39,242	75,351	b

Ergebnisse Futterqualität

Tabelle A22: Ergebnisse des linearen gemischten Modells (Typ-III-Wald- χ^2 -Test) zur ME des Grünlandaufwuchses.

Effekt	χ^2	df	p-Wert
Position	1,385	4	0,847
Park	11,052	2	0,004
Position x Park	9,026	8	0,340

Tabelle A23: Geschätzte Mittelwerte (Estimated Marginal Means, EMMs) der ME für die fünf Positionen in den drei Solarparks einschließlich Standardfehler und 95 %-Konfidenzintervalle.

Position	Park	EMMs	Standardfehler	df	Unteres 95%-Konfidenzintervall	Oberes 95%-Konfidenzintervall
free	GG	11,200	0,180	13,519	10,812	11,589
gap	GG	11,048	0,180	13,519	10,660	11,437
halfshade	GG	11,030	0,180	13,519	10,642	11,418
shade	GG	11,050	0,180	13,519	10,662	11,439
edge	GG	11,098	0,180	13,519	10,709	11,486
free	LB	10,750	0,180	13,519	10,361	11,138
gap	LB	10,635	0,180	13,519	10,246	11,023
halfshade	LB	10,881	0,180	13,519	10,492	11,269
shade	LB	11,012	0,180	13,519	10,623	11,400
edge	LB	10,796	0,180	13,519	10,407	11,184
free	KR	10,352	0,180	13,519	9,964	10,741
gap	KR	10,493	0,180	13,519	10,105	10,881
halfshade	KR	10,199	0,180	13,519	9,811	10,588
shade	KR	10,400	0,180	13,519	10,012	10,789
edge	KR	10,440	0,180	13,519	10,052	10,829

Tabelle A24: Paarweise Tukey-Vergleiche der geschätzten Mittelwerte der ME zwischen den Solarparks.

Vergleich	Mittlere Differenz	Standardfehler	df	t-Wert	Tukey-adjustierter p-Wert
GG – LB	0,271	0,208	6	1,303	0,444
GG - KR	0,708	0,208	6	3,407	0,033
LB - KR	0,437	0,208	6	2,105	0,169

Tabelle A25: Ergebnisse der Typ-III-Varianzanalyse der linearen gemischten Modelle zur Untersuchung des Einflusses von Position, Solarpark und ihrer Interaktion auf die Futterqualitätsparameter des Grünlandaufwuchses. Angegeben sind die F-Werte und zugehörigen p-Werte.

Parameter	Effekt	F	P-Wert
Rohprotein	Position	66,044	< 0,001
Rohprotein	Park	42,491	< 0,001
Rohprotein	Position x Park	3,055	0,003
Rohfaser	Position	14,807	< 0,001
Rohfaser	Park	21,610	< 0,001
Rohfaser	Position x Park	0,871	0,542
NDF	Position	8,845	< 0,001
NDF	Park	39,279	< 0,001
NDF	Position x Park	3,567	0,001
ADF	Position	1,804	0,131
ADF	Park	76,517	< 0,001
ADF	Position x Park	2,134	0,035

Tabelle A26: Geschätzte marginale Mittelwerte (Estimated Marginal Means, EMMs) der Futterqualitätsparameter des Grünlandaufwuchses getrennt nach Position und Solarpark. Angegeben sind Mittelwert, Standardfehler, 95 %-Konfidenzintervall sowie die Signifikanzgruppen des Tukey-Tests.

Rohprotein							
Position	Park	EMMs	Standard- fehler	df	Unteres 95%- Konfidenzintervall	Oberes 95%- Konfidenzintervall	Gruppe
free	GG	118,184	7,751	100,529	97,891	138,478	a
gap	GG	118,904	7,751	100,529	98,611	139,198	a
halfshade	GG	147,715	7,751	100,529	127,422	168,009	ab
edge	GG	165,686	7,751	100,529	145,393	185,980	b
shade	GG	229,309	7,751	100,529	209,016	249,603	c
free	LB	88,259	7,751	100,529	67,966	108,553	a
gap	LB	105,892	7,751	100,529	85,598	126,185	ab
halfshade	LB	109,196	7,751	100,529	88,903	129,490	ab
edge	LB	126,572	7,751	100,529	106,279	146,866	b
shade	LB	189,552	7,751	100,529	169,259	209,846	c
gap	KR	90,804	7,751	100,529	70,510	111,097	a
free	KR	91,524	7,751	100,529	71,231	111,818	a
edge	KR	117,139	7,751	100,529	96,846	137,433	a
halfshade	KR	118,967	7,751	100,529	98,673	139,260	ab
shade	KR	148,327	7,751	100,529	128,034	168,621	b
Rohfaser							
Position	Park	EMMs	Standard- fehler	df	Unteres 95%- Konfidenzintervall	Oberes 95%- Konfidenzintervall	Gruppe
shade	GG	206,558	11,456	33,156	175,348	237,768	a
free	GG	244,135	11,456	33,156	212,925	275,345	ab
edge	GG	248,804	11,456	33,156	217,594	280,013	b
halfshade	GG	249,910	11,456	33,156	218,700	281,120	b

gap	GG	256,992	11,456	33,156	225,782	288,201	b
shade	LB	190,759	11,456	33,156	159,550	221,969	a
gap	LB	234,811	11,456	33,156	203,601	266,020	b
halfshade	LB	242,344	11,456	33,156	211,134	273,554	b
edge	LB	245,707	11,456	33,156	214,497	276,917	b
free	LB	268,177	11,456	33,156	236,967	299,387	b
shade	KR	233,045	11,456	33,156	201,835	264,255	a
gap	KR	283,298	11,456	33,156	252,088	314,508	b
free	KR	283,565	11,456	33,156	252,356	314,775	b
halfshade	KR	289,936	11,456	33,156	258,726	321,145	b
edge	KR	290,348	11,456	33,156	259,138	321,557	b
NDF							
Position	Park	EMMs	Standard- fehler	df	Unteres 95%- Konfidenzintervall	Oberes 95%- Konfidenzintervall	Gruppe
shade	GG	491,926	21,492	7,086	417,347	566,504	a
edge	GG	494,918	21,492	7,086	420,339	569,496	a
free	GG	502,468	21,492	7,086	427,889	577,046	a
halfshade	GG	502,546	21,492	7,086	427,968	577,125	a
gap	GG	521,349	21,492	7,086	446,771	595,928	a
shade	LB	434,595	21,492	7,086	360,016	509,173	a
gap	LB	469,747	21,492	7,086	395,168	544,325	a
halfshade	LB	471,999	21,492	7,086	397,421	546,578	a
edge	LB	479,493	21,492	7,086	404,915	554,071	a
free	LB	541,805	21,492	7,086	467,227	616,384	b
shade	KR	482,515	21,492	7,086	407,936	557,093	a
free	KR	568,830	21,492	7,086	494,252	643,409	b
halfshade	KR	582,117	21,492	7,086	507,539	656,696	b
gap	KR	584,018	21,492	7,086	509,440	658,597	b
edge	KR	594,875	21,492	7,086	520,297	669,454	b
ADF							
Position	Park	EMMs	Standard- fehler	df	Unteres 95%- Konfidenzintervall	Oberes 95%- Konfidenzintervall	Gruppe
free	GG	281,862	9,563	28,757	255,569	308,155	a
shade	GG	297,773	9,563	28,757	271,481	324,066	ab
halfshade	GG	298,663	9,563	28,757	272,370	324,956	ab
gap	GG	305,927	9,563	28,757	279,634	332,220	ab
edge	GG	319,671	9,563	28,757	293,378	345,963	b
halfshade	LB	340,263	9,563	28,757	313,970	366,556	a
gap	LB	342,333	9,563	28,757	316,040	368,626	a
edge	LB	343,715	9,563	28,757	317,422	370,008	a
shade	LB	343,886	9,563	28,757	317,593	370,179	a
free	LB	344,337	9,563	28,757	318,044	370,630	a
shade	KR	340,277	9,563	28,757	313,984	366,570	a
gap	KR	364,747	9,563	28,757	338,454	391,040	ab

edge	KR	374,069	9,563	28,757	347,776	400,362	b
halfshade	KR	376,189	9,563	28,757	349,896	402,482	b
free	KR	379,832	9,563	28,757	353,539	406,125	b

Tabelle A27: Ergebnisse der Tukey-Post-hoc-Tests für die Futterqualitätsparameter des Grünlandaufwuchses innerhalb der einzelnen Solarparks. Angegeben sind die paarweisen Mittelwertsdifferenzen, Standardfehler, Teststatistik und p-Werte.

Rohprotein						
Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standardfehler	df	t-Wert	p-Wert
free - gap	GG	-0,720	10,765	163	-0,067	1,000
free - halfshade	GG	-29,531	10,765	163	-2,743	0,052
free - shade	GG	-111,125	10,765	163	-10,322	< 0,001
free - edge	GG	-47,502	10,765	163	-4,412	< 0,001
gap - halfshade	GG	-28,811	10,765	163	-2,676	0,062
gap - shade	GG	-110,405	10,765	163	-10,255	< 0,001
gap - edge	GG	-46,782	10,765	163	-4,346	< 0,001
halfshade - shade	GG	-81,594	10,765	163	-7,579	< 0,001
halfshade - edge	GG	-17,971	10,765	163	-1,669	0,456
shade - edge	GG	63,623	10,765	163	5,910	< 0,001
free - gap	LB	-17,632	10,765	163	-1,638	0,476
free - halfshade	LB	-20,937	10,765	163	-1,945	0,298
free - shade	LB	-101,293	10,765	163	-9,409	< 0,001
free - edge	LB	-38,313	10,765	163	-3,559	0,004
gap - halfshade	LB	-3,304	10,765	163	-0,307	0,998
gap - shade	LB	-83,661	10,765	163	-7,771	< 0,001
gap - edge	LB	-20,681	10,765	163	-1,921	0,310
halfshade - shade	LB	-80,356	10,765	163	-7,464	< 0,001
halfshade - edge	LB	-17,376	10,765	163	-1,614	0,491
shade - edge	LB	62,980	10,765	163	5,850	< 0,001
free - gap	KR	0,720	10,765	163	0,067	1,000
free - halfshade	KR	-27,443	10,765	163	-2,549	0,085
free - shade	KR	-56,803	10,765	163	-5,276	< 0,001
free - edge	KR	-25,615	10,765	163	-2,379	0,126
gap - halfshade	KR	-28,163	10,765	163	-2,616	0,072
gap - shade	KR	-57,523	10,765	163	-5,343	< 0,001
gap - edge	KR	-26,335	10,765	163	-2,446	0,108
halfshade - shade	KR	-29,360	10,765	163	-2,727	0,054
halfshade - edge	KR	1,828	10,765	163	0,170	1,000
shade - edge	KR	31,188	10,765	163	2,897	0,034
Rohfaser						
Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standardfehler	df	t-Wert	p-Wert
free - gap	GG	-12,857	14,713	163	-0,874	0,906
free - halfshade	GG	-5,775	14,713	163	-0,393	0,995

free - shade	GG	37,577	14,713	163	2,554	0,084
free - edge	GG	-4,669	14,713	163	-0,317	0,998
gap - halfshade	GG	7,082	14,713	163	0,481	0,989
gap - shade	GG	50,434	14,713	163	3,428	0,007
gap - edge	GG	8,188	14,713	163	0,557	0,981
halfshade - shade	GG	43,352	14,713	163	2,947	0,030
halfshade - edge	GG	1,106	14,713	163	0,075	1,000
shade - edge	GG	-42,246	14,713	163	-2,871	0,037
free - gap	LB	33,366	14,713	163	2,268	0,161
free - halfshade	LB	25,833	14,713	163	1,756	0,403
free - shade	LB	77,418	14,713	163	5,262	< 0,001
free - edge	LB	22,470	14,713	163	1,527	0,546
gap - halfshade	LB	-7,533	14,713	163	-0,512	0,986
gap - shade	LB	44,051	14,713	163	2,994	0,026
gap - edge	LB	-10,896	14,713	163	-0,741	0,947
halfshade - shade	LB	51,585	14,713	163	3,506	0,005
halfshade - edge	LB	-3,363	14,713	163	-0,229	0,999
shade - edge	LB	-54,947	14,713	163	-3,735	0,002
free - gap	KR	0,267	14,713	163	0,018	1,000
free - halfshade	KR	-6,370	14,713	163	-0,433	0,993
free - shade	KR	50,520	14,713	163	3,434	0,007
free - edge	KR	-6,782	14,713	163	-0,461	0,991
gap - halfshade	KR	-6,637	14,713	163	-0,451	0,991
gap - shade	KR	50,253	14,713	163	3,416	0,007
gap - edge	KR	-7,050	14,713	163	-0,479	0,989
halfshade - shade	KR	56,891	14,713	163	3,867	0,001
halfshade - edge	KR	-0,412	14,713	163	-0,028	1,000
shade - edge	KR	-57,303	14,713	163	-3,895	0,001
NDF						
Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standardfehler	df	t-Wert	p-Wert
free - gap	GG	-18,882	21,598	163	-0,874	0,906
free - halfshade	GG	-0,079	21,598	163	-0,004	1,000
free - shade	GG	10,542	21,598	163	0,488	0,988
free - edge	GG	7,550	21,598	163	0,350	0,997
gap - halfshade	GG	18,803	21,598	163	0,871	0,907
gap - shade	GG	29,424	21,598	163	1,362	0,653
gap - edge	GG	26,432	21,598	163	1,224	0,738
halfshade - shade	GG	10,621	21,598	163	0,492	0,988
halfshade - edge	GG	7,629	21,598	163	0,353	0,997
shade - edge	GG	-2,992	21,598	163	-0,139	1,000
free - gap	LB	72,059	21,598	163	3,336	0,009
free - halfshade	LB	69,806	21,598	163	3,232	0,013
free - shade	LB	107,211	21,598	163	4,964	< 0,001

free - edge	LB	62,312	21,598	163	2,885	0,035
gap - halfshade	LB	-2,252	21,598	163	-0,104	1,000
gap - shade	LB	35,152	21,598	163	1,628	0,482
gap - edge	LB	-9,746	21,598	163	-0,451	0,991
halfshade - shade	LB	37,404	21,598	163	1,732	0,417
halfshade - edge	LB	-7,494	21,598	163	-0,347	0,997
shade - edge	LB	-44,898	21,598	163	-2,079	0,234
free - gap	KR	-15,188	21,598	163	-0,703	0,956
free - halfshade	KR	-13,287	21,598	163	-0,615	0,973
free - shade	KR	86,315	21,598	163	3,996	0,001
free - edge	KR	-26,045	21,598	163	-1,206	0,748
gap - halfshade	KR	1,901	21,598	163	0,088	1,000
gap - shade	KR	101,504	21,598	163	4,700	< 0,001
gap - edge	KR	-10,857	21,598	163	-0,503	0,987
halfshade - shade	KR	99,603	21,598	163	4,612	< 0,001
halfshade - edge	KR	-12,758	21,598	163	-0,591	0,976
shade - edge	KR	-112,360	21,598	163	-5,202	< 0,001
ADF						
Vergleich	Park	Mittlere Differenz	Standardfehler	df	t-Wert	p-Wert
free - gap	GG	-24,066	12,121	163	-1,986	0,278
free - halfshade	GG	-16,801	12,121	163	-1,386	0,637
free - shade	GG	-15,912	12,121	163	-1,313	0,684
free - edge	GG	-37,809	12,121	163	-3,119	0,018
gap - halfshade	GG	7,265	12,121	163	0,599	0,975
gap - shade	GG	8,154	12,121	163	0,673	0,962
gap - edge	GG	-13,743	12,121	163	-1,134	0,788
halfshade - shade	GG	0,889	12,121	163	0,073	1,000
halfshade - edge	GG	-21,008	12,121	163	-1,733	0,417
shade - edge	GG	-21,897	12,121	163	-1,807	0,373
free - gap	LB	2,004	12,121	163	0,165	1,000
free - halfshade	LB	4,074	12,121	163	0,336	0,997
free - shade	LB	0,450	12,121	163	0,037	1,000
free - edge	LB	0,621	12,121	163	0,051	1,000
gap - halfshade	LB	2,070	12,121	163	0,171	1,000
gap - shade	LB	-1,553	12,121	163	-0,128	1,000
gap - edge	LB	-1,382	12,121	163	-0,114	1,000
halfshade - shade	LB	-3,623	12,121	163	-0,299	0,998
halfshade - edge	LB	-3,452	12,121	163	-0,285	0,999
shade - edge	LB	0,171	12,121	163	0,014	1,000
free - gap	KR	15,085	12,121	163	1,245	0,725
free - halfshade	KR	3,642	12,121	163	0,301	0,998
free - shade	KR	39,554	12,121	163	3,263	0,012
free - edge	KR	5,763	12,121	163	0,475	0,989

gap - halfshade	KR	-11,442	12,121	163	-0,944	0,879
gap - shade	KR	24,470	12,121	163	2,019	0,262
gap - edge	KR	-9,322	12,121	163	-0,769	0,939
halfshade - shade	KR	35,912	12,121	163	2,963	0,028
halfshade - edge	KR	2,120	12,121	163	0,175	1,000
shade - edge	KR	-33,792	12,121	163	-2,788	0,046

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich ganz herzlich bei meinen Betreuerinnen Dr. Dina Hamidi und Dr. Karen Baumann für die engagierte Betreuung meiner Masterarbeit bedanken. Vielen Dank für die fachliche Unterstützung, wertvollen Ratschläge und die Motivation während der gesamten Bearbeitungszeit.

Mein besonderer Dank gilt außerdem Jasmin Hiller, die mich bei den praktischen Arbeiten in der Abteilung unterstützt und mir bei Fragen stets weitergeholfen hat.

Darüber hinaus möchte ich mich herzlich bei Dr. Caroline Siede bedanken, die mich bei Fragen zur Formel zur Bewertung der Futterqualität unterstützt hat.

Eidesstaatliche Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne fremde Hilfe selbstständig verfasst und nur die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken entnommene Stellen habe ich unter Angabe der Quellen kenntlich gemacht. Die Richtlinien zur Sicherung der guten wissenschaftlichen Praxis an der Universität Göttingen wurden von mir beachtet.

Aurich, den 10.08.2026

P. Roster

Erklärung zur Nutzung von ChatGPT und vergleichbaren Werkzeugen im Rahmen von Prüfungen

In der hier vorliegenden Arbeit habe ich ChatGPT oder eine andere KI wie folgt genutzt:

☐ gar nicht

☒ bei der Ideenfindung

☐ bei der Erstellung der Gliederung

☐ zum Erstellen einzelner Passagen, insgesamt im Umfang von ...% am gesamten Text

☐ zur Entwicklung von Software-Quelltexten

☒ zur Optimierung oder Umstrukturierung von Software-Quelltexten

☒ zum Korrekturlesen oder Optimieren

☐ Weiteres, nämlich: ...

Ich versichere, alle Nutzungen vollständig angegeben zu haben. Fehlende oder fehlerhafte

Angaben werden als Täuschungsversuch gewertet.

Aurich, den 10.08.2026

P. Roster