

# Analyse der Vegetation von drei Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) im Raum Freiberg

## Analysis of the vegetation of three ground-mounted photovoltaic parks (PV-FFA) in the Freiberg area

Noah Zappék, Roland Achtziger, Karin Glaser, Elke Richert

**Zusammenfassung:** In dieser Arbeit wurde die Vegetation von drei unterschiedlichen Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) in der Umgebung von Freiberg (Landkreis Mittelsachsen) aufgenommen und vergleichend analysiert. Zu diesem Zweck wurden in jeder Anlage Vegetationsaufnahmen in mehreren Flächentriplets (unter dem Modul, direkt an der Oberkante des Moduls, zwischen den Modulen) angelegt. Insgesamt wurden in den drei Anlagen 84 Pflanzenarten sowie zwei Pflanzengesellschaften mit vier bzw. zwei Ausprägungen nachgewiesen. Die *Poa pratensis*-*Alopecurus pratensis*-Gesellschaft kam auf den beweideten und gleichzeitig feuchteren und nährstoffreicheren Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune 2 vor. Für die Anlage Davidschacht, die auf Bergmaterial des historischen Bergbaus angelegt wurde, konnte hingegen eine *Trifolium pratense*-*Achillea millefolium*-Gesellschaft identifiziert werden. Die junge Anlage Tannenhübel zeigte auf der Mehrzahl der Untersuchungsflächen eine Ausprägung mit der Pionierart *Agrostis stolonifera*, was auf eine fortlaufende Entwicklung der Vegetationszusammensetzung hinweist. Die modulbeeinflussten Flächen und die nicht modulbeeinflussten Flächen wiesen auf allen drei Anlagen unterschiedliche Ausprägungen der Pflanzengesellschaften auf. Die Analyse der pflanzlichen Zeigerwerte nach Ellenberg zeigte, dass die Standortbedingungen wie Bodenfeuchte und Nährstoffverfügbarkeit einen deutlicheren Einfluss auf die Vegetation hatten als das Alter der Anlage. Ein über alle Anlagen eindeutiger Einfluss der Module auf die Vegetation zeigte sich in einigen Parametern: So war die Bodenfeuchte auf den regenbeeinflussten Flächen zwischen den Modulen und am Rand der Module (teilbeschattet) am höchsten. Die Flächen unter den Modulen wiesen eine höhere Gesamtdiversität auf als die Flächen zwischen den Modulen. Auf diesen besonnten Flächen war der Anteil einjähriger Arten an der Gesamtartenzahl am größten und sie wiesen zudem die höchsten Werte für die Streudeckung auf. Ein indirekter Einfluss der Module zeigte sich bei der Beweidung durch Schafe, die sich bevorzugt im Schattenbereich der Module aufhielten und über den Eintrag von Kot zu einer Erhöhung der Nährstoffverfügbarkeit auf diesen Stellen beitrugen. Insgesamt zeigen die Untersuchungen, dass PV-FFA vielen Pflanzenarten einen Lebensraum bieten können und die Module dazu beitragen, kleinräumige Unterschiede in den Standorteigenschaften zu bedingen, welche sich wiederum positiv auf die Pflanzendiversität auswirken.

**Schlüsselwörter/Keywords:** Artenzusammensetzung, Vegetationsstruktur, Biodiversität, Beschattung, Unterwuchsbewirtschaftung/species composition, vegetation structure, biodiversity, shading, plant undergrowth management

## 1. Einleitung

Der Ausbau der erneuerbaren Energien stellt eine zentrale Säule für die Dekarbonisierung der Stromerzeugung dar (BfN 2020). Um die Ausbauziele der erneuerbaren Energien bis 2035 zu erreichen, ist nach BMWK (2023) ein Ausbau der Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) um 11 Gigawatt (GW) pro Jahr ab 2026 nötig. Als Folge wird die Flächeninanspruchnahme durch PV-FFA zunehmen (BfN 2020). Daher sind Untersuchungen zur Auswirkung der Module auf die abiotische und biotische Umwelt (Mikroklima, Artenzusammensetzung, Biodiversität etc.) von hoher wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Relevanz (Gómez-Catasús et al. 2024).

Generell bestehen die Auswirkungen von Photovoltaik-Modulen auf die Vegetation hauptsächlich in der zeitweisen Beschattung (Licht- und Einstrahlungsreduktion) und der Reduktion von Niederschlag der unter oder in unmittelbarer Nähe der Module befindlichen Bereiche (Thrän et al. 2020). So konnten Armstrong et al. (2016) zeigen, dass PV-Module einen Einfluss auf das Mikroklima im Tagesverlauf und im saisonalen Verlauf haben: So war der Boden unter den Modulen deutlich kühler als auf den Kontrollflächen abseits der Module und in den Reihenzwischenräumen. Außerdem fanden sie, dass die tägliche Variation der Lufttemperatur unter den Modulen von Frühling bis Herbst geringer war als auf Kontrollflächen und Reihenzwischenräumen sowie, dass die

Temperaturen unter den Modulen während des Tages dauerhaft kühler und während der Nacht dauerhaft wärmer waren. Durch die höheren nächtlichen Temperaturen kann die Entstehung von Tau unter den Modulen verhindert werden, wodurch der abkühlende Effekt durch die Evaporation des Taus ausbleibt und somit die Wahrscheinlichkeit für Frostereignisse unter den Modulen verringert wird. Weitere Untersuchungen befassten sich mit den Einflüssen auf die Vegetationszusammensetzung (Uldrijan et al. 2022, 2023) sowie auf Mikroklima und biochemische Kreisläufe (Armstrong et al. 2016; Choi et al. 2020; Vervloesem et al. 2022).

Durch die Änderung des Strahlungs- und Niederschlagsregimes sind auch Auswirkungen auf die Artenzusammensetzung und Diversität von Flora und Fauna in PV-FFA zu erwarten. So beschäftigten sich einige Studien bereits mit dem Einfluss von PV-FFA auf die Pflanzenvielfalt und Zusammensetzung der Vegetation (z. B. Montag et al. 2016; Bai et al. 2022; Vervloesem et al. 2022) sowie mit der Diversität von Bestäubern (z. B. Montag et al. 2016; Blaydes et al. 2021, 2022; Uldrijan et al. 2022) und anderen Tierarten wie Vögeln oder Reptilien (z. B. Montag et al. 2016; Peschel et al. 2019). Peschel & Peschel (2025) haben in einer bundesweiten Studie Daten zur Nutzung, Vegetation und verschiedenen Tierartengruppen in 31 PV-FFA erhoben und deren Potenzial für Natur- und Artenschutz sowie die Förderung der Biodiversität herausgestellt. Durch die üblicherweise fehlende Düngung und extensive Bewirtschaftung des Unterwuchses (ein- bis zweimalige Mahd, extensive Beweidung, Peschel et al. 2019) können sich z. B. an nährstoffarme Bedingungen angepasste Pflanzenarten ansiedeln und sich so naturschutzfachlich wertvolle Pflanzengesellschaften entwickeln (z. B. Wirth 2022). Daher können PV-FFA, insbesondere in der Agrarlandschaft, potentiell als Habitate und Rückzugsräume für bestimmte Pflanzen- und Tierarten dienen und somit einen wichtigen Beitrag zum Schutz und zur Förderung der Biodiversität leisten (z. B. Hernandez et al. 2014; Montag et al. 2016; Peschel et al. 2019; Thrän et al. 2020; Blaydes et al. 2021; Wirth 2022; Peschel & Peschel 2025). Einige Studien weisen auch auf die Bedeutung von PV-Anlagen im Kontext von Agrivoltaik-Systemen hin (Kombination von PV-Anlagen und Ackerbau, z. B. Schlegel 2021; Sturchio et al. 2022; Wydra et al. 2022).

Wie Gómez-Catasús et al. (2024) in einer Metastudie mit über 2.000 untersuchten Artikeln zeigten, besteht hinsichtlich des Einflusses von Photovoltaik-Freiflächenanlagen auf die verschiedenen Umweltkompartimente weiterhin ein großer Forschungsbedarf. Im vorliegenden Beitrag werden ausgewählte Ergebnisse einer Bachelorarbeit im Studiengang Geoökologie der TU Bergakademie Freiberg (Zappek 2024, unpubl.) vorgestellt. In dieser Arbeit wurden im Jahr 2023 drei PV-FFA in der Umgebung von Freiberg untersucht, die sich bzgl. Alter, Unterwuchsnutzung und Standorteigenschaften wie geologischer Untergrund, Boden und Mikroklima voneinander unterschieden. Hier werden die drei Anlagen bzgl. der Artenzusammensetzung und Pflanzendiversität sowie wichtiger Vegetationsstruktur- und Standortparameter miteinander verglichen. Außerdem wird der Einfluss der Photovoltaik-Module auf die kleinräumige Vegetationsausbildung anhand von Flächentriplets entlang eines durch die Module bedingten Beschattungs- und Niederschlagsgradienten analysiert.

## 2. Untersuchungsgebiet

### 2.1 Geografische Lage

Die drei untersuchten Photovoltaik-Freiflächenanlagen liegen im Osten von Freiberg (Abb. 1): Die Anlage **Davidsschacht** (DS, in Abb. 1 grün markiert) befindet sich südlich der Spülhalde Davidsschacht auf einer ehemaligen Bergehalde, die Anlage **Ziegelscheune 2** (ZS, in Abb. 1 blau markiert) befindet sich auf der nördlichen Seite der B173 in der Nähe des Gewerbe- und Industriegebietes Freiberg Ost und der **Bürgersolarpark Tannenhübel** (TH, in Abb. 1 gelb markiert) befindet sich im Osten von Hilbersdorf an der Bahnstrecke Freiberg-Dresden. Alle drei Anlagen liegen in einem stadtnahen, überwiegend landwirtschaftlich geprägten Umfeld. Aufgrund der unterschiedlichen Flächengrößen wurde für die Vegetationsuntersuchungen in jeder Anlage eine etwa gleich große Fläche betrachtet (in Abb. 1 schwarz gestrichelt umrandet).

### 2.2 Kennzeichnende Merkmale der PV-Freiflächenanlagen

In Tabelle 1 sind wichtige Parameter wie Alter und Unterwuchsnutzung der drei untersuchten PV-Anlagen im Vergleich zusammengestellt. So weisen die Anlagen ein unterschiedliches Alter auf: Die Anlagen Davidsschacht (Inbetriebnahme 2008) und Ziegelscheune 2 (nachfolgend Ziegelscheune genannt; Inbetriebnahme 2010) sind deutlich älter als der Bürgersolarpark Tannenhübel (nachfolgend auch Anlage Tannenhübel genannt; Inbetriebnahme 2021). Des Weiteren unterschieden sich die Anlagen hinsichtlich der Reihenabstände und damit der freien und besonnten Fläche zwischen den Modulen: Hierbei wies die Anlage Tannenhübel mit 3 m den geringsten und die Anlage Davidsschacht mit 7 m den größten Reihenabstand auf (vgl. Abb. 2). Auch die Modulhöhen unterschieden sich zwischen den Anlagen (Tabelle 1). Zum Zeitpunkt der Untersuchungen (Mai-August 2023) wurden die Anlagen Ziegelscheune und Tannenhübel beweidet und die Anlage Davidsschacht gemäht (Tabelle 1).



**Abb. 1:** Lage der untersuchten Photovoltaik-Freiflächenanlagen; TH – Tannenhübel, ZS – Ziegelscheune 2, DS – Davidschacht (Kartengrundlage: 20 cm Orthofotos; Quelle GeoSN).

**Fig. 1:** Location of the studied ground-mounted PV parks: TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune; DS – Davidschacht. (source of map: 20 cm ortho images; source GeoSN).

**Tabelle 1:** Übersicht über wichtige Anlagenparameter der drei ausgewählten Photovoltaikanlagen.

**Table 1:** Overview of key system parameters of the three studied PV parks.

Parameter	Tannenhübel (TH)	Ziegelscheune (ZS)	Davidschacht (DS)
Erstmalige Inbetriebnahme	2021	2010	2008
Hauptausrichtung <sup>a)</sup>	Süd	Süd	Süd
Reihenabstand <sup>b)</sup>	3 m	5 m	7 m
Modulhöhe (untere Kante)	0,9 m	ca. 1,10 m	1,30 m
Nutzung der Vegetation im Untersuchungszeitraum	Beweidung max. 1 Mahd/Jahr	Beweidung max. 1 Mahd/Jahr	keine Beweidung mehrmalige Mahd/Jahr (ab Mai alle 6 Wochen)

<sup>a)</sup> Bundesnetzagentur – MaStR, CC BY-ND 3.0 DE | <sup>b)</sup> Messung in QGIS anhand der 20 cm Orthofotos (GeoSN)

### 2.3 Naturräumliche Charakterisierung

Das Untersuchungsgebiet liegt in der Landschaftseinheit „Unteres Osterzgebirge“ (LfULG 2011). Es dominieren die monotonen Paragneise des Freiberger-Fürstenwalder Blockes (Mannsfeld & Syrbe 2008). Im Gebiet der Anlage Davidschacht handelt es sich um Biotit-Zweifeldspatgneis, wobei die PV-Anlage auf einem aufgeschütteten Haldenkörper (Bergehalde) steht. Im Gebiet der Anlage Ziegelscheune befinden sich Biotit-Zweifeldspatgneis und Rhyolith. Monzogranit bzw. Granit charakterisieren die Lithologie im Gebiet des Bürgersolarparks Tannenhübel (LfULG 2020a). Die Anlage Ziegelscheune erstreckt sich über zwei Bodentypen, wobei es sich bei dem in dieser Arbeit untersuchten Teilbereich um Stauwasserböden handelt (LfULG 2020b). Auch die Anlage Tannenhübel befindet sich auf Stauwasserböden. Die Böden der PV-Anlage auf der Halde „Davidschacht“ sind geprägt durch das aufgebrachte Abdeckmaterial.

Klimatisch befindet sich Sachsen im Übergangsbereich zwischen maritimen und kontinentalen Klimaeinflüssen (Mannsfeld & Syrbe 2008). Die dem Untersuchungsgebiet nächstgelegene Wetterstation mit langjähriger Datenerfassung für Monats- bzw. Jahresmittelwerte der Temperatur und Niederschlagssumme ist die Station Nossen (ID: 6314). Das langjährige Mittel (1950-2023) der Lufttemperatur beträgt 8,7 °C, das der Niederschlagssumme 621 mm. Sowohl das Jahresmittel der Niederschlagssumme als auch das der Lufttemperatur lagen 2023 über dem langjährigen Mittel von 1950-2023. Als Potentielle natürliche Vegetation (PNV) geben Schmidt et al. (2002) für den Bereich der Anlage Davidschacht Submontanen Eichen-Buchenwald und für den untersuchten Teil der Anlage Ziegelscheune sowie für die Anlage Tannenhübel Zittergrasseggen-Eichen-Buchenwald an.



**Abb. 2:** Fotos der drei Photovoltaikanlagen: (a, b) Tannenhübel, (c, d) Ziegelscheune, (e, f) Davidschacht (Fotos: N. Zappek).  
**Fig. 2:** Photos of the three PV parks: (a, b) Tannenhübel, (c, d) Ziegelscheune, (e, f) Davidschacht (photos: N. Zappek).

### 3. Methoden

#### 3.1 Vegetationskundliche Aufnahmen und NMS

Zur Aufnahme und Analyse der Vegetation sowie zur Untersuchung des Einflusses der Module auf die kleinräumige Vegetationsausbildung wurden in jeder Anlage wie folgt mehrere Flächentriplets (Minitransekte) entlang des Beschattungsgradienten einzelner Module angelegt (Abb. 3): Eine der drei Flächen (Flächentyp **M**) befand sich direkt und zentral unter dem Photovoltaik-Modul (schattig, kein Niederschlag, voller Moduleinfluss). Die mittlere Fläche (Flächentyp **H**) lag direkt an der Oberkante des Moduls (schattig bis halbschattig, Niederschlag teilweise reduziert durch angrenzendes Modul, mäßiger Moduleinfluss). Die dritte Fläche des Triplets (Flächentyp **S**) befand sich auf der freien Fläche zwischen den Modulen (halbschattig bis sonnig, voller Niederschlag, geringer bis kein Moduleinfluss). Die **Aufnahmeflächen** waren 1 m x 3 m groß (lange Seite parallel zum Modulvorderrand) und wurden vor jeder Aufnahme mit mehreren Gliedermaßstäben umgrenzt (Abb. 3). Die Auswahl der Flächen erfolgte nach der Homogenität in der Artenzusammensetzung und Struktur sowie der Repräsentativität für die Gesamtanlage. Die vegetationskundlichen Aufnahmen auf den Flächen des Triplets erfolgten in Anlehnung an die Methode von Braun-Blanquet (z. B. Dierschke 1994; Wittig 2012). Auf den Aufnahmeflächen wurden alle höheren Pflanzenarten und ihre Abundanz entsprechend der Symbole aus Tabelle 2 erfasst.



**Abb. 3:** Beispieldotos der Flächentriplets in den drei untersuchten Anlagen: (a-c) Tannenhübel, (e-g) Ziegelscheune, (h-j) Davidschacht; M – unter dem Modul, H – an der Oberkante des Moduls, S – zwischen den Modulen (Fotos: N. Zappek 2023).

**Fig. 3:** Example photos of triplets in the three PV parks studied: (a-c) Tannenhübel, (e-g) Ziegelscheune, (h-j) Davidschacht; M – under modules, H – at the upper edge of the modules, S – between modules (photos: N. Zappek 2023).

**Tabelle 2:** Verwendete Symbole für die Erfassung der Arthäufigkeiten in Anlehnung an Dierschke (1994) und die entsprechenden Code replacement-Werte (CR-Wert).

**Table 2:** Symbols used for recording species abundance based on Dierschke (1994) and the corresponding code replacement values (CR-Wert).

Symbol	Definition	CR-Wert
r	< 1% deckend, 1 Individuum, kleine Wuchsform	1,0
+	<1% deckend, 1-5 Individuen, kleine Wuchsform	1,5
1	1-5% deckend	2,5
a	6-15% deckend	10,0
b	16-25% deckend	20,0
3	26-50% deckend	37,5
4	51-75% deckend	62,5
5	76-100% deckend	87,5

### 3.2 Berechnete Indizes und Auswertungsmethoden

Zusätzlich zu den im Gelände erhobenen Vegetationsstrukturparametern wurden mit der Software SORT (Durka & Ackermann 1993) für die Aufnahmen **mittlere gewichtete Ellenberg-Zeigerwerte** (Ellenberg & Leuschner 2010) und die mittlere gewichtete Mahd- und Weideverträglichkeit nach Briemle et al. (2002) berechnet. Die Gewichtung erfolgte entsprechend der Code replacement-Werte aus Tabelle 2. Auf Basis der mit SORT ermittelten Gesamtzahl an Arten pro Untersuchungsfläche einer Anlage und den Angaben zur **Lebensform** aus Ellenberg & Leuschner (2010) wurden die Anteile der Therophyten und Hemikryptophyten an der Gesamtartenzahl berechnet. In Anlehnung an die Arbeiten von Armstrong et al. (2016) wurde auch das Verhältnis der Anzahl der Nicht-Grasarten zu den Grasarten berechnet. Des Weiteren wurden unter Verwendung des Programms SORT die Artenzahl sowie Shannon-Index und Evenness pro Aufnahmefläche berechnet (Formeln s. Magurran 2013). Für den Vergleich der Gesamtartenzahlen von Gebieten mit unterschiedlich vielen Aufnahmeflächen wurden mit Hilfe des Programms SORT mittlere **Artenakkumulationskurven** (Shinozaki-Kurven) berechnet (Formel s. Achtziger et al. 1992). Mithilfe dieser Kurven können Aussagen darüber getroffen werden, wie viele Arten im Mittel bei einer bestimmten Anzahl an untersuchten Flächen zu erwarten wären (vgl. z. B. Funke et al. 2017). Zur Darstellung der Ähnlichkeiten der Artenzusammensetzung der Plots in den drei PV-FFA wurde eine **nMDS** (nonmetrical multidimensional scaling) und eine Ähnlichkeitsanalyse (Anosim) unter Verwendung des Pakets vegan (Version 2.4-8, Oksanen et al. 2025) in R durchgeführt (Version 4.4.1, R core team 2024).

## 4. Ergebnisse

### 4.1 Artenzusammensetzung und Pflanzengesellschaften

Insgesamt wurden auf den drei Anlagen 16 Flächentriplets, also 48 **Vegetationsaufnahmen** angelegt (Tabelle A1 im Anhang). Die Triplets verteilten sich wie folgt auf die drei Anlagen: Anlage Davidschacht (DS) 7 Triplets (21 Einzelflächen), Anlage Tannenhübel (TH) 5 Triplets (15 Einzelflächen), Anlage Ziegelscheune 2 (ZS) 4 Triplets (12 Einzelflächen). Im Rahmen der vegetationskundlichen Aufnahmen konnten insgesamt 84 höhere Pflanzenarten nachgewiesen werden. In der **Vegetationstabelle** Tabelle A1 im Anhang wurden die Aufnahmen (Spalten) von links nach rechts entsprechend der Artabundanzen und der Ähnlichkeit der Artenzusammensetzung angeordnet. Eine große Gruppe von Grünlandarten wie *Festuca rubra* und *Holcus lanatus* kam auf allen drei Anlagen vor. Es zeigt sich, dass einige Arten wie *Trifolium dubium* und *Vicia hirsuta* ausschließlich auf den älteren Anlagen DS und ZS vorkamen (Tabelle A1/Spalte 17-48). Von diesen Arten abgesehen, wiesen die drei Anlagen eine spezifische eigene Artenzusammensetzung auf.

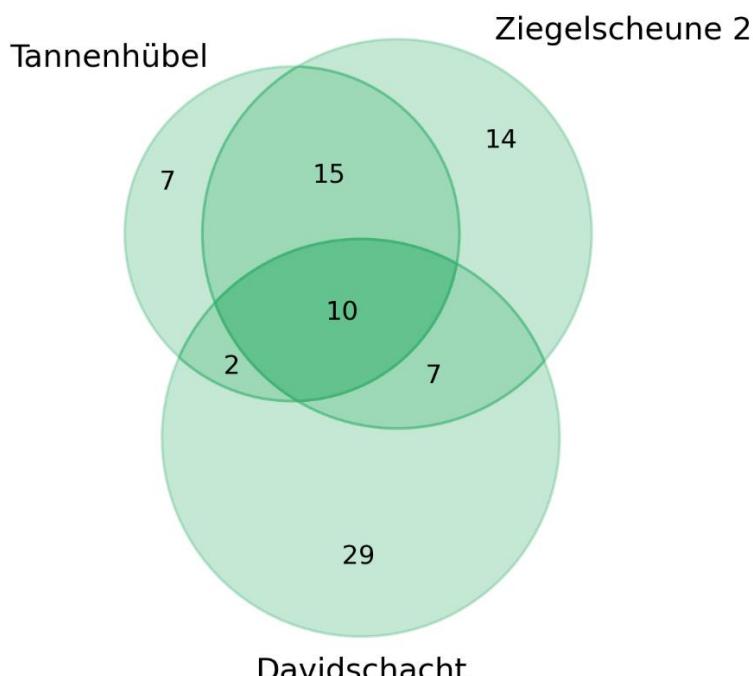
Insgesamt konnten zwei **Pflanzengesellschaften** mit jeweils mehreren Ausprägungen unterschieden werden: Die *Poa pratensis-Alopecurus pratensis*-Gesellschaft (Tabelle A1/1-27) und die *Trifolium pratense-Achillea millefolium*-Gesellschaft (Tabelle A1/28-48). Kennzeichnend für die *Poa pratensis-Alopecurus pratensis*-Gesellschaft waren Arten nährstoffreicher, mild bis mäßig saurer Standorte. Die Gesellschaft kam auf den beiden beweideten Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune vor und besaß vier Ausprägungen. Die Ausprägung mit der Pionierart *Agrostis stolonifera* (Tabelle A1/1-10) kam überwiegend auf den Flächen unter den Modulen (M) und den niederschlags- und modulbeeinflussten Flächen an der Oberkante der Module (H) der Anlage Tannenhübel vor. Die namensgebenden Arten der Ausprägung mit *Anthoxanthum odoratum* und *Cynosurus cristatus* weisen auf eher frische Standorte hin und kamen überwiegend auf den Flächen des Typ S der Anlage Tannenhübel vor (Tabelle A1/13-16), aber auch auf allen Flächentypen der Anlage Ziegelscheune (Tabelle A1/17-21). Auf der Anlage Ziegelscheune kamen die Ausprägung feucht bis nasser und mäßig saurer Standorte mit *Juncus effusus*

(Tabelle A1/17-21) sowie die Ausprägung besonders nährstoffreicher Standorte mit *Urtica dioica* (Tabelle A1/22-27) vor. Letztere dominierte in den Flächentypen M und H. Die Flächentypen M und H der Anlage Davidschacht waren durch die typische Ausprägung der *Trifolium pratense-Achillea millefolium*-Gesellschaft gekennzeichnet (Tabelle A1/28-36), die Flächen des Typs S durch die Ausprägung mit *Festuca ovina* agg. (Tabelle A1/37-48). Letztere deutet auf mäßig trockene bis trockene, mäßig saure und nährstoffarme, magere Standortbedingungen hin. Die typische Ausprägung wurde durch *Achillea millefolium*, *Trifolium pratense* und *Hypochaeris radicata* geprägt, die auf mäßig trockene bis frische sowie mäßig saure und nährstoffreiche Standortbedingungen hinweisen.

## 4.2 Vergleich der Photovoltaikfreiflächenanlagen

### 4.2.1 Artenzusammensetzung

In Tabelle A2 (Anhang) sind alle aufgenommenen Arten und ihr entsprechendes Vorkommen hinsichtlich der drei Anlagen aufgeführt. Insgesamt zeigt sich, dass lediglich 10 der 84 Arten (11,9 %) auf allen drei Anlagen vorkamen (s. Venn-Diagramm in Abb. 4). Dies waren typische Grünlandarten wie *Lolium perenne* oder *Dactylis glomerata*. Die Anzahl an Arten, die lediglich auf einer Anlage nachgewiesen wurde, war bei der Anlage Davidschacht mit 29 von insgesamt 48 Arten (60,4 %) besonders hoch. Magerkeitszeiger wie *Hypochaeris radicata* und *Pilosella officinarum*, aber auch *Crepis capillaris* und *Trifolium campestre* kamen nur auf dieser Anlage vor. 15 Arten kamen sowohl auf der Anlage Tannenhübel als auch auf der Anlage Ziegelscheune, nicht aber auf der Anlage Davidschacht vor (Tabelle A2, s. Abb. 4). Sie deuten auf mild bis mäßig saure, nährstoffreiche meist trocken bis frische Verhältnisse hin und zeigen, dass sich diese beiden Anlagen hinsichtlich der Standortbedingungen deutlich von der Anlage Davidschacht unterscheiden. Auf der Anlage Tannenhübel kamen 7 von 34 Arten (20,6 %) nur auf dieser Anlage vor. Insgesamt deuten die Arten auf frische und nährstoffreiche Standorte hin. Für die Anlage Ziegelscheune wurden insgesamt 46 Arten nachgewiesen (Tabelle A2), davon kamen 14 (29,8 %) nur auf dieser Anlage vor. Hierzu zählten die Feuchtezeiger *Chenopodium polyspermum* und *Lychnis flos-cuculi* sowie die Nässezeiger *Achillea ptarmica* und *Juncus effusus*. Zwar kamen auf den Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune auch Magerkeitszeiger wie *Anthoxanthum odoratum*, *Poa angustifolia*, *Dechampsia flexuosa* vor, diese besaßen aber nur eine geringe Stetigkeit (vgl. Tabelle A1). Der auf allen Anlagen vorkommende Magerkeits- und Säurezeiger *Agrostis capillaris* wies für die Anlage Davidschacht eine deutlich höhere Stetigkeit auf als für die anderen Anlagen (DS: 17/21; TH: 4/15; ZS: 1/14) (vgl. Tabelle A1). Dies bestätigt, dass sich die Anlage Davidschacht hinsichtlich der Artenzusammensetzung und der Standorteigenschaften deutlich von den beiden anderen Anlagen unterscheidet. Eine detaillierte Auswertung der Artenzusammensetzung der einzelnen Flächentypen findet sich in Zappek (2024, unpubl.).



**Abb. 4:** Venn-Diagramm für die Pflanzenartenzahlen in den drei untersuchten PV-FFA.

**Fig. 4:** Venn diagram of the plant species of the three PV parks studied.

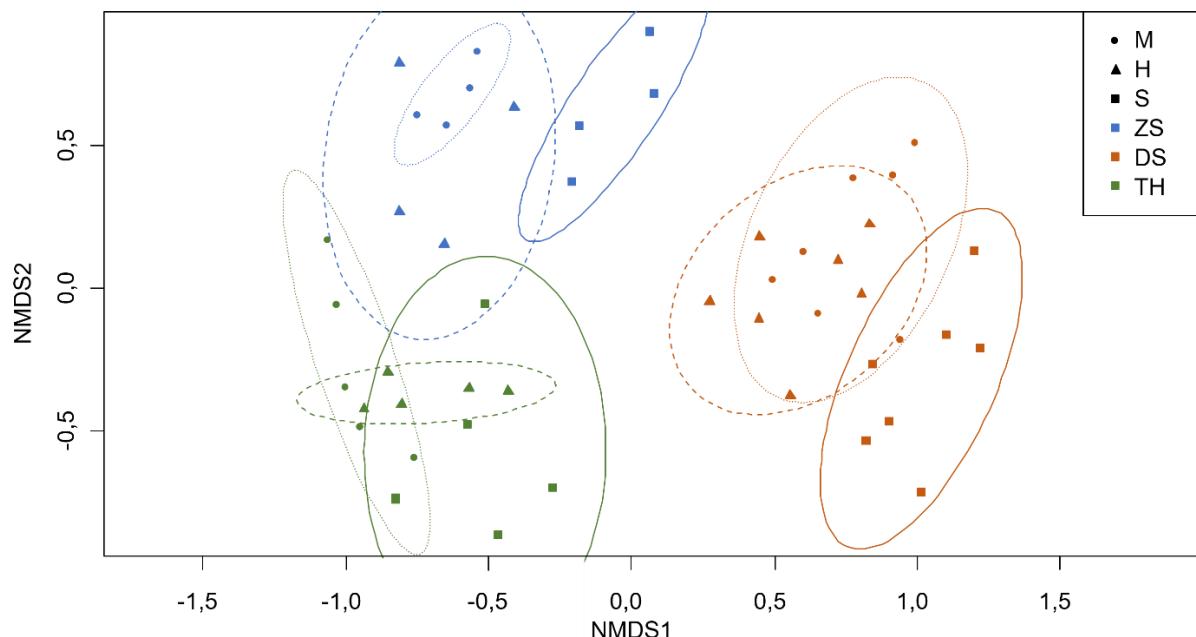
In der über alle Plots durchgeführten nMDS-Ordinierung (Abb. 5) zeigt sich, dass die Artenzusammensetzung in erster Linie die PV-Anlagen widerspiegeln: Die Pflanzenartengemeinschaften der Aufnahmeflächen unterscheiden sich signifikant entsprechend der PV-Anlage (Anosim:  $R = 0,8$ ,  $p = 0,001$ ). Wie bereits anhand der Vegetationstabelle und des Venn-Diagramms (Abb. 4) gezeigt, bestätigt sich auch durch diese Analyse, dass sich die Anlage Davidschacht in ihrer Artenzusammensetzung von den anderen beiden PV-Anlagen unterschied (Abb. 5). Innerhalb der Anlagen ähneln sich die Aufnahmeflächen entsprechend der einzelnen Flächentypen M, H oder S, wobei die besonnten Flächen ohne Moduleinfluss (S) insbesondere in den Anlagen Davidschacht und Ziegelscheune von den anderen beiden Flächentypen mit Moduleinfluss (M, H) abgegrenzt werden können (Abb. 5).

#### 4.2.2 Diversitätsparameter

Mit im Mittel 14,1 Arten bzw. 13,7 Pflanzenarten pro Aufnahmefläche wiesen die älteren Anlagen Davidschacht und Ziegelscheune höhere Artenzahlen als die jüngere Anlage Tannenhübel mit im Mittel 9,6 Arten auf (Tabelle 3). Dies gilt auch für die Gesamtartenzahlen pro Anlage sowie für die mittleren Shannon-Diversitätsindizes und Evenness-Werte (Tabelle 3). Da sich die Anlagen bzgl. der Anzahl an Aufnahmeflächen unterschieden (Tabelle 3), wurden zum Vergleich der Gesamtartenzahlen mittlere Artenakkumulationskurven (Shinozaki-Kurven) berechnet (Abb. 6). Es zeigt sich, dass bei einer einheitlichen Anzahl von 12 Aufnahmeflächen auf den Anlagen Davidschacht bzw. Tannenhübel mit 40,4 (DS) bzw. 31,4 (TH) deutlich weniger Arten zu erwarten gewesen wären als auf der Anlage Ziegelscheune festgestellt (46 Arten). Die Analyse bestätigt, dass die beiden älteren Anlagen Davidschacht und Ziegelscheune höhere Artenzahlen als die jüngere Anlage Tannenhübel aufwiesen, wobei die Anlage Ziegelscheune die pro Untersuchungsfläche höchste Artenakkumulation besaß und somit bei der Untersuchung von weiteren Flächen die höchste Gesamtartenzahl zeigen würde (vgl. Abb. 6).

#### 4.2.3 Vegetationsstrukturparameter, mittlere Zeigerwerte und Nutzwertzahlen, Lebensformanteile

In Tabelle 4 sind die Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichungen für die gemessenen Vegetationsparameter sowie die berechneten mittleren Ellenberg-Zeigerwerte, Nutzwertzahlen und Anteile ausgewählter Lebensformen pro Photovoltaikanlage und über alle Anlagen zusammengestellt; der jeweils höchste Wert bezogen auf die Anlagen wurde **fett** markiert. Aufgrund der räumlichen Interkorrelationen der Aufnahmeflächen innerhalb der Triplets (s.o.) wurden von statistischen Analysen wie Mittelwertvergleichen abgesehen.



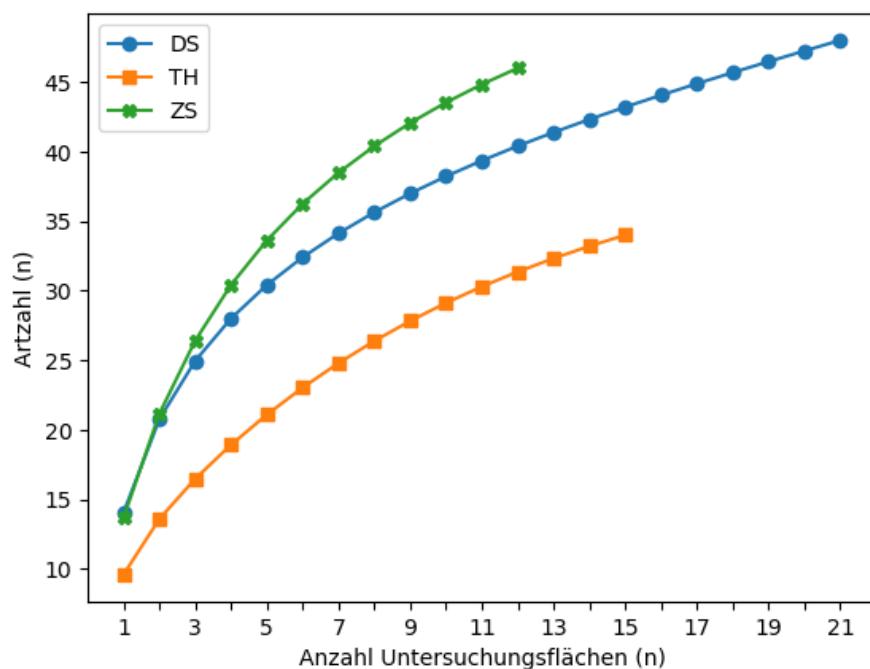
**Abb. 5:** nMDS der Pflanzenartengemeinschaft von drei PV-Anlagen mit Unterscheidung von 3 Flächentypen, Ellipsen stellen 90% Konfidenzintervalle der Flächentypen innerhalb jeder PV-Anlage dar. blau – Ziegelscheune (ZS), orange – Davidschachthalde (DS), grün – Tannenhübel (TH), Kreis – beschattete Flächen unter den Modulen (M), Dreieck – halbbeschattete Fläche an der Oberkante des Moduls (H), Quadrat – sonnige Flächen zwischen den Modulen (S); Stress = 0,17.

**Fig. 5:** nMDS of the plant species community of three PV systems, distinguishing three area types. Ellipses represent 90% confidence intervals of the area types within each PV park. Blue – Ziegelscheune (ZS), orange – Davidschachthalde (DS), green – Tannenhübel (TH), circle – shaded areas below the modules (M), triangle – semi-shaded area at the upper edge of the module (H), square – sunny area between the modules (S); stress = 0.17.

**Tabelle 3:** Diversitätsparameter der drei untersuchten PV-Anlagen Tannenhübel (TH), Ziegelscheune (ZS) und Davidschacht (DS) sowie über alle Anlagen (Gesamt). n – Anzahl an Untersuchungsflächen, MW – Mittelwert, s – Standardabweichung, S – Artenzahl, Sges – Gesamtartenzahl, S(12) – erwartete Artenzahl bei 12 Aufnahmeflächen (s. Abb. 6), Hs – Shannon-Diversitätsindex, E – Evenness (%).

**Table 3:** Diversity parameters of the PV parks Tannenhübel (TH), Ziegelscheune (ZS), and Davidschacht (DS) and for all PV parks (Gesamt). n – number of study sites, MW – mean, s – standard deviation, S – species number, Sges – total species number, S(12) – expected species number for 12 study sites (see Fig. 6), Hs – Shannon diversity index, E – evenness (%).

Parameter	TH	ZS	DS	Gesamt
<b>n</b>	15	12	21	48
<b>MW S ± s</b>	9,60 ± 1,88	13,67 ± 3,50	14,05 ± 3,53	12,56 ± 3,65
<b>Sges</b>	34	46	48	84
<b>S(12)</b>	31,4	46,0	40,4	-
<b>MW Hs ± s</b>	1,55 ± 0,28	1,88 ± 0,32	2,14 ± 0,34	1,89 ± 0,40
<b>MW E ± s</b>	68,87 ± 9,74	73,75 ± 9,14	82,00 ± 9,76	75,83 ± 11,04



**Abb. 6:** Shinozaki-Kurven der drei PV-Anlagen: TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune; DS – Davidschacht.

**Fig. 6:** Shinozaki curves for the three PV parks: DS – Davidschacht; TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune.

Beim Vergleich der **Vegetationsstrukturparameter** zeigt sich, dass alle Parameter der Deckung und Höhe der Krautschicht (Dges, DKraut, HKraut) sowie der Abundanzsumme (Abs) auf der Anlage Ziegelscheune die höchsten Werte erreichten, jeweils gefolgt von der Anlage Tannenhübel (Tabelle 4). Dagegen zeigten die Deckung der Moos- und der Streuschicht in der Anlage Davidschacht die höchsten Werte (Tabelle 4). Bzgl. der mittleren gewichteten **Ellenberg-Zeigerwerte** für Feuchte, Bodenreaktion und Stickstoff (mF, mR, mN) wiesen die Flächen der Anlage Tannenhübel die höchsten Werte auf, z.T. dicht gefolgt (mF, mN) von denen der Anlage Ziegelscheune. Die Flächen der Anlage Davidschacht waren im Mittel trockener und nährstoffärmer als die der beiden anderen Anlagen (Tabelle 4). Die höchste mittlere **Mahdverträglichkeit** (mM) wiesen die Flächen der Anlage Tannenhübel (Mahd und Beweidung, vgl. Tabelle 1) auf, gefolgt von denen der Anlage Davidschacht (mehrfache Mahd); dagegen wies die Anlage Ziegelscheune (Mahd und Beweidung) die höchste **Weideverträglichkeit** (mW) auf (Tabelle 4). Der höchste Anteil an Therophyten (Thero %) wurde auf den Flächen der Anlage Ziegelscheune nachgewiesen, gefolgt von der Anlage Davidschacht; der Anteil an Hemikryptophyten (Hemikrypt %) war dagegen in der Anlage Tannenhübel am höchsten (Tabelle 4). Das höchste **Nichtgrasarten zu Grasarten-Verhältnis** wiesen mit einem Wert von im Mittel 3,9 die Flächen der Anlage Davidschacht auf, hier waren demnach fast viermal so viele Kraut- und Gehölzarten als Grasarten zu finden. Auf den Flächen der Anlage Ziegelscheune war dieses Verhältnis mit einem Wert von 1,05 ausgeglichen, während in der Anlage Tannenhübel bei einem Wert von 0,58 die Anzahl der Grasarten überwogen (Tabelle 4).

**Tabelle 4:** Mittelwerte  $\pm$  Standardabweichung für Vegetationsstrukturparameter, mittlere Zeigerwerte und Nutzwertzahlen, Anteile an ausgewählten Lebensformen der drei untersuchten Anlagen Tannenhübel (TH), Ziegelscheune (ZS) und Davidschacht (DS) sowie über alle Anlagen (Gesamt). n – Anzahl an Aufnahmeflächen; Vegetationsstrukturparameter: Dges (%) – Deckung gesamt (%), DKraut – Deckung Krautschicht (%), DMoos – Deckung Moosschicht (%), DStreu (%) = Deckung Streuschicht (%), HKraut (cm) – Höhe Krautschicht (cm), Abs – Abundanzsumme; mittlere Ellenberg-Zeigerwerte/Nutzwertzahlen: mF – mittlere Feuchtezahl, mR – mittlere Reaktionszahl, mN – mittlere Stickstoffzahl, mM – mittlere Mähverträglichkeit, mW – mittlere Weideverträglichkeit; Anteile von Lebensformen: Thero (%) – Anteil Arten Therophyten (%), Hemikrypt (%) – Anteil Arten Hemikryptophyten (%), NGr/Gr – Nicht-Grasarten zu Grasarten-Verhältnis; **fett** – höchster Wert.

**Table 4:** Mean values  $\pm$  standard deviation for parameters of vegetation structure, mean Ellenberg indicator values and utility values, proportions of life forms of the PV parks Tannenhübel (TH), Ziegelscheune (ZS), and Davidschacht (DS) and for all PV parks (Gesamt). n – number of study sites; parameters of vegetation structure: Dges (%) – total coverage (%), DKraut – coverage herb layer (%), DMoos – coverage moss layer (%), DStreu (%) – coverage litter layer (%), HKraut (cm) – height herb layer (cm), Abs – sum of abundances; mean Ellenberg indicator values and utility numbers: mF – mean indicator value for moisture, mR – mean indicator value for soil reaction, mN – mean indicator value for, nitrogen mM – mean mowing tolerance, mW – mean grazing tolerance; proportions of life forms: Thero (%) – proportion of therophytes (%), Hemikrypt (%) – proportion of hemicryptophytes (%), NGr/Gr – non grass species/grass species ratio; **bold** – highest value.

Parameter	TH	ZS	DS	Gesamt
n	15	12	21	48
<b>Dges (%)</b>	$85,3 \pm 11,3$	<b><math>90,0 \pm 6,4</math></b>	$73,1 \pm 17,6$	$81,2 \pm 15,3$
<b>DKraut (%)</b>	$75,0 \pm 15,5$	<b><math>88,6 \pm 7,3</math></b>	$55,0 \pm 17,5$	$69,7 \pm 20,3$
<b>DMoos (%)</b>	$17,4 \pm 18,5$	$3,4 \pm 5,3$	<b><math>45,5 \pm 27,5</math></b>	$26,2 \pm 27,5$
<b>DStreu (%)</b>	$22,5 \pm 21,8$	$28,0 \pm 20,2$	<b><math>34,1 \pm 25,0</math></b>	$29,0 \pm 23,0$
<b>HKraut (cm)</b>	$45,5 \pm 22,4$	<b><math>67,1 \pm 9,4</math></b>	$16,5 \pm 6,8$	$37,6 \pm 24,9$
<b>Abs</b>	$83,0 \pm 20,0$	<b><math>114,3 \pm 25,1</math></b>	$64,1 \pm 25,3$	$82,6 \pm 30,8$
<b>mF</b>	<b><math>5,91 \pm 0,30</math></b>	$5,86 \pm 0,19$	$5,07 \pm 0,34$	$5,53 \pm 0,50$
<b>mR</b>	<b><math>5,81 \pm 0,45</math></b>	$5,54 \pm 1,05$	$5,80 \pm 0,33$	$5,74 \pm 0,61$
<b>mN</b>	<b><math>5,93 \pm 0,60</math></b>	$5,92 \pm 0,94$	$4,62 \pm 0,75$	$5,36 \pm 0,99$
<b>mM</b>	<b><math>7,47 \pm 0,47</math></b>	$6,29 \pm 0,65$	$7,21 \pm 0,95$	$7,06 \pm 0,87$
<b>mW</b>	$5,60 \pm 0,85$	<b><math>6,35 \pm 1,12</math></b>	$6,10 \pm 0,57$	$6,01 \pm 0,86$
<b>Thero (%)</b>	$5,80 \pm 6,07$	<b><math>16,67 \pm 11,5</math></b>	$13,76 \pm 7,6$	$12,00 \pm 9,27$
<b>Hemikrypt (%)</b>	<b><math>89,27 \pm 9,11</math></b>	$74,08 \pm 11,56$	$71,24 \pm 9,47$	$77,54 \pm 12,63$
<b>NGr/Gr</b>	$0,58 \pm 0,30$	$1,05 \pm 0,40$	<b><math>3,90 \pm 1,73</math></b>	$2,15 \pm 1,95$

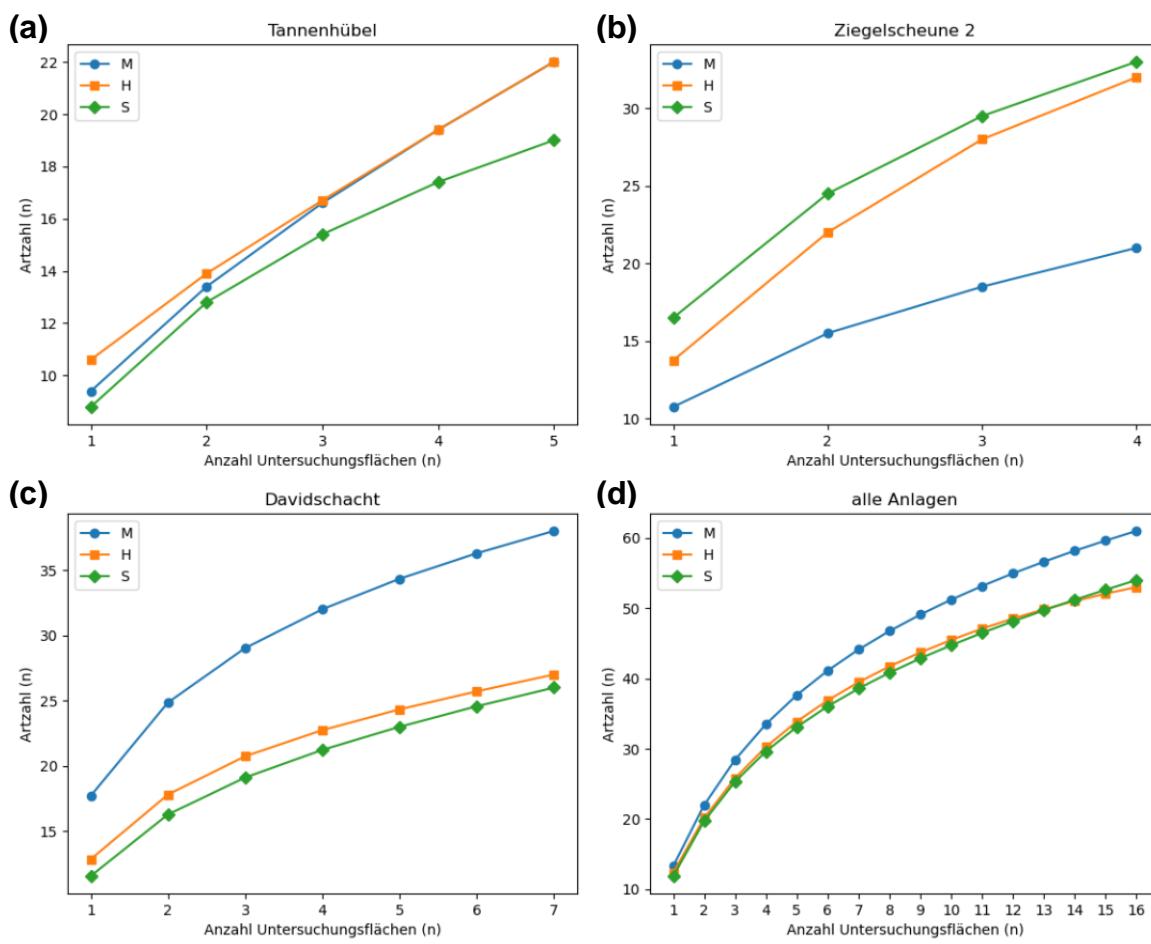
### 4.3 Einfluss der Module: Vergleich der Flächentypen

Um den Einfluss der Module auf wichtige Vegetations- und Standortparameter zu untersuchen, werden im Folgenden die Flächentypen der Triplets (vgl. Abb. 3) pro Anlage bzgl. der Muster entlang des untersuchten Gradienten vergleichend analysiert.

#### 4.3.1 Diversität und Lebensformen

In Abb. 7 sind die mittleren Artenakkumulationskurven (Shinozaki-Kurven) für die drei Flächentypen pro Anlage (Abb. 7a-c) und über alle drei Anlagen (Abb. 7d) im Vergleich aufgetragen. Dabei ergibt sich kein einheitliches Muster bzgl. der **Diversität** über die Anlagen: In der Anlage Tannenhübel wiesen die Flächen der Modulzwischenräume (S) geringere  $\alpha$ -Diversitäten (Anfangspunkte der Kurven) und Gesamtartenzahlen (Endpunkte der Kurven) als die Flächen mit Moduleinfluss (M, H) auf (Abb. 7a), in der Anlage Ziegelscheune galt dies für die Flächen unter den Modulen (M) im Vergleich mit denen an der Oberkante oder im Zwischenraum (H, S) (Abb. 7b), wogegen in der Anlage Davidschacht auf diesen Flächen geringere Werte festgestellt wurden als auf den Flächen unter den Modulen (M in Abb. 7c). Über alle Anlagen betrachtet wies der Flächentyp M deutlich höhere Diversitäten auf als die beiden anderen Flächentypen H und S, deren Kurven fast deckungsgleich verliefen (Abb. 7d).

In Abb. 8 sind die Artenzahlen, das Verhältnis von Nicht-Grasarten zu Grasarten und die Anteile ausgewählter Lebensformen pro Anlage für die Flächentypen der Triplets dargestellt. Die mittleren **Artenzahlen** pro Flächentyp zeigten auf den drei untersuchten Anlagen kein einheitliches Muster (Abb. 8a): Während die Artenzahlen auf der Anlage Ziegelscheune im Mittel vom Flächentyp M über H zum Typ S zunahm, nahm sie auf der Anlage Davidschacht mit abnehmendem Einfluss der Module von M über H zu S ab (Abb. 8a). Die Anlage Tannenhübel wies geringere Unterschiede zwischen den verschiedenen Flächentypen auf, wobei die Artenzahlen an der Oberkante (H) der Module am höchsten waren.



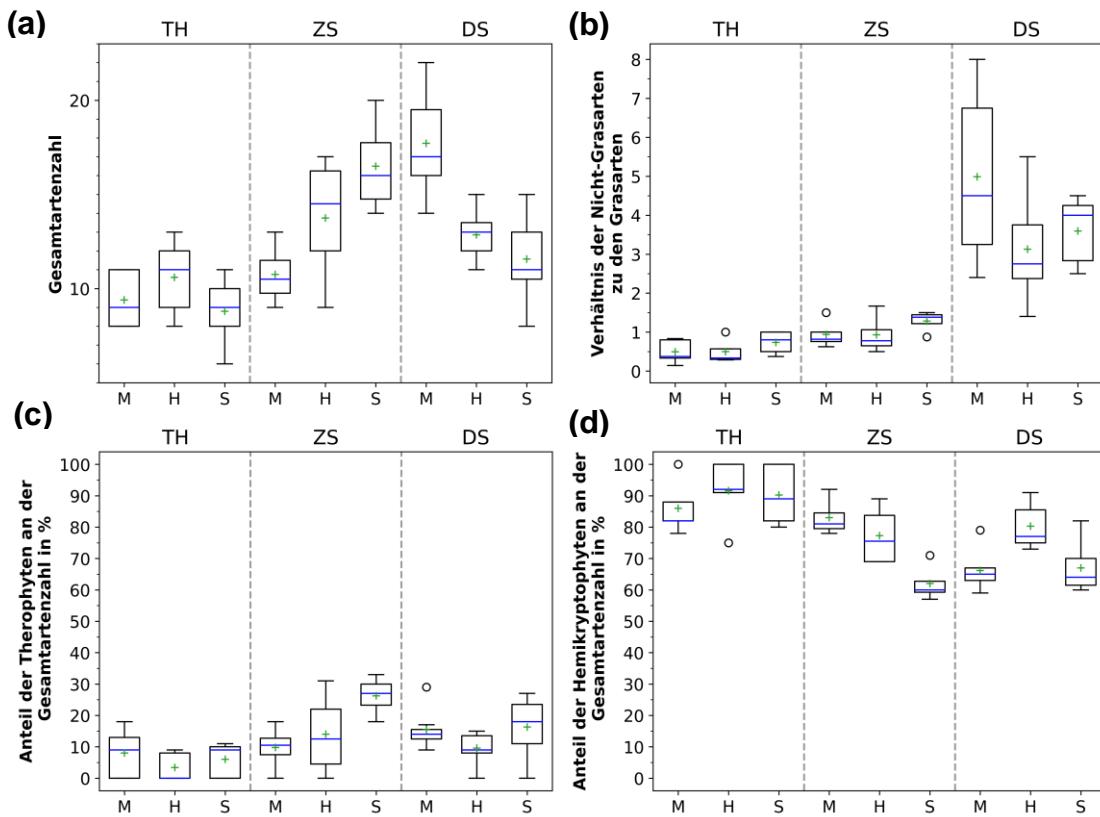
**Abb. 7:** Shinozaki-Kurven der Flächentypen für die drei PV-Anlagen (a-c) und über alle Anlagen zusammen (d). M – unter dem Modul, H – an der Oberkante des Moduls, S – zwischen den Modulen.

**Fig. 7:** Shinozaki-curves for the plot types for each (a-c) and across all of the three (d) PV parks. M – under modules, H – at the upper edge of the modules, S – between modules.

Das Verhältnis der **Nicht-Grasarten zu Grasarten** (Abb. 8b) zeigte auf den Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune für den Flächentyp S etwas höhere Werte als für die Flächentypen M und H. Auf der Anlage Davidschacht war das Verhältnis Nicht-Grasarten zu Grasarten unter den Modulen (M) am höchsten, gefolgt von S und H (Abb. 8b). Hinsichtlich der Anteile bestimmter **Lebensformen** an der Gesamtartenzahl ergaben sich sowohl für den Anteil der Therophyten (Abb. 8c) als auch der Hemikryptophyten (Abb. 8d) in den drei Anlagen keine einheitlichen Muster im Gradienten des Moduleinflusses (M – H – S): So war der Anteil der Therophyten auf den Anlagen Ziegelscheune und Davidschacht im Mittel auf Flächen-Typ S am höchsten, während er auf der Anlage Tannenhübel unter dem Modul (M) etwas höhere Werte aufwies. Der Anteil an Hemikryptophyten zeigte für die Anlagen und Flächentypen ein gegenläufiges Muster (Abb. 8d).

#### 4.3.2 Vegetationsstrukturparameter

Auch bzgl. der untersuchten Vegetationsstrukturparameter zeigten sich wenige übereinstimmende Muster im Gradienten des Moduleinflusses (Abb. 9): Während auf der Anlage Tannenhübel die höchsten Werte für die **Deckung der Krautschicht** auf den gering beeinflussten Flächen (S) festzustellen waren, wiesen in den Anlagen Ziegelscheune und Davidschacht die Flächen unter den Modulen (M) die höchsten Krautschichtdeckungen auf (Abb. 9a). Auch bzgl. der **Wuchshöhe der Krautschicht** unterschieden sich die Flächentypen in allen Anlagen im Mittel nur geringfügig; es zeigten sich auch keine einheitlichen Muster bzgl. des Moduleinflusses (Abb. 9b). Dagegen war die **Deckung der Moosschicht** in allen Anlagen an der Oberkante der Module (H) am höchsten, gefolgt von Flächentyp M (ZS, DS) oder S (TH) (Abb. 9c). Die im Mittel höchsten Werte für die **Deckung der Streuschicht** wiesen in allen drei Anlagen die Flächen mit geringem Moduleinfluss (S) auf, die geringsten Werte die Flächen an der Oberkante (ZS, DS) oder unter dem Modul (TH) (Abb. 9d).



**Abb. 8:** (a) Artenzahl, (b) Verhältnis Nichtgrasarten zu Grasarten, (c) Anteil der Therophyten an der Gesamtartenzahl (%) und (d) Anteil der Hemikryptophyten an der Gesamtartenzahl (%) für die einzelnen Anlagen gruppiert nach Flächentypen; M – unter dem Modul, H – an der Oberkante des Moduls, S – zwischen den Modulen. PV-Anlagen: TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune 2; DS – Davidschacht; blaue Linie – Median, grünes Kreuz – arithmetisches Mittelwert.

**Fig. 8:** (a) species number, (b) non-grass species to grass species ratio, (c) proportion of therophytic species (%), and (d) proportion of hemicryptophytic species (%) of the PV parks grouped by the plot type: M – under modules; H – at the upper edge of the modules; S – between modules. PV park: TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune 2; DS – Davidschacht; blue line – median; green cross – arithmetic mean.

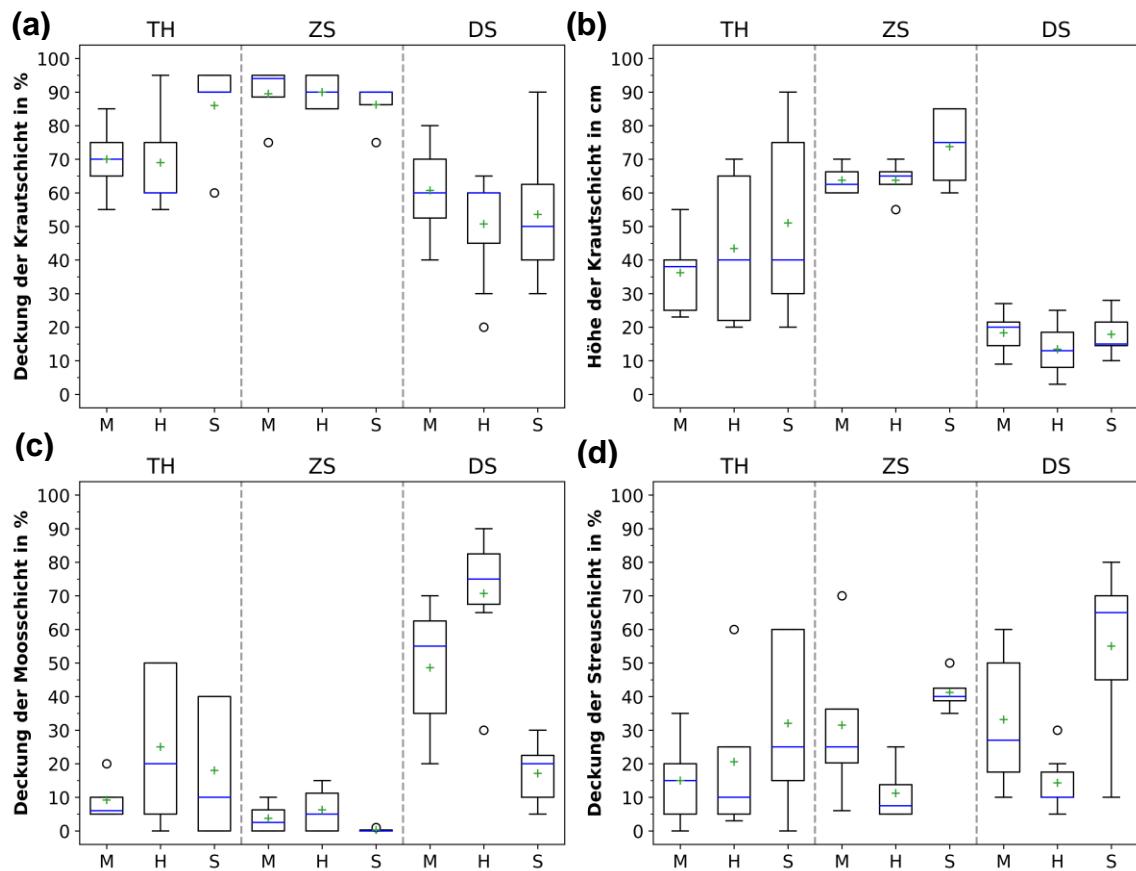
#### 4.3.3 Ellenberg-Zeigerwerte und Nutzwertzahlen

In Abb. 10 sind die Veränderungen der mittleren Ellenberg-Zeigerwerte für Licht, Feuchte und Stickstoff sowie die mittlere Weideverträglichkeit im Gradienten des Moduleinflusses (M – H – S) für die drei Anlagen im Vergleich dargestellt. Auch hier zeigten sich nur wenige übereinstimmende Muster zwischen den Anlagen bzgl. des Einflusses der Module. So zeigte sich für die **mittleren Lichtzahlen** nur in der Anlage Ziegelscheune der erwartete Anstieg im Beschattungsgradienten, in den anderen beiden Anlagen wies der Flächentyp H die höchsten Werte auf (Abb. 10a). Über alle Anlagen betrachtet waren die **mittleren Feuchtezahlen** im Flächentyp H am höchsten (Abb. 10b), wobei die Unterschiede zwischen den Flächentypen jeweils sehr gering waren. In den Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune war die mittlere Stickstoffzahl auf den Flächen unter dem Modul (M) am höchsten und auf den besonnten Flächen (S) am geringsten (Abb. 10c); auch für die Anlage Davidschacht war die mittlere Stickstoffstoffspezieszahl im Mittel auf dem Flächentyp S am geringsten. Die Analyse der **mittleren Weideverträglichkeit** der beweideten Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune ergab, dass mit abnehmendem Moduleinfluss (M zu S) eine Abnahme der mittleren Weideverträglichkeitszahl einherging (Abb. 10d).

## 5. Diskussion

### 5.1 Bedeutung der Standortbedingungen, Nutzung und Alter für die Vegetation der Anlagen

Die drei untersuchten PV-FFA unterschieden sich deutlich hinsichtlich ihrer **Standortbedingungen** und Nutzung (vgl. Tabelle 1): Während die Anlage Davidschacht auf einer Bergehalde mit Abraummaterial des Freiberger Bergbaus angelegt wurde (z.B. Fritz & Jahns 2017), befanden sich die Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune auf natürlich anstehenden Stauwasserböden (LfULG 2020b). Die Auswertung der Zeigerwerte ergab entsprechend, dass im Vergleich die Anlage Davidschacht durch geringere Bodenfeuchte und Nährstoffverfügbarkeit gekennzeichnet ist, während die Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune im nährstoffreicherem und feuchteren Bereich lagen (Tabelle 4).

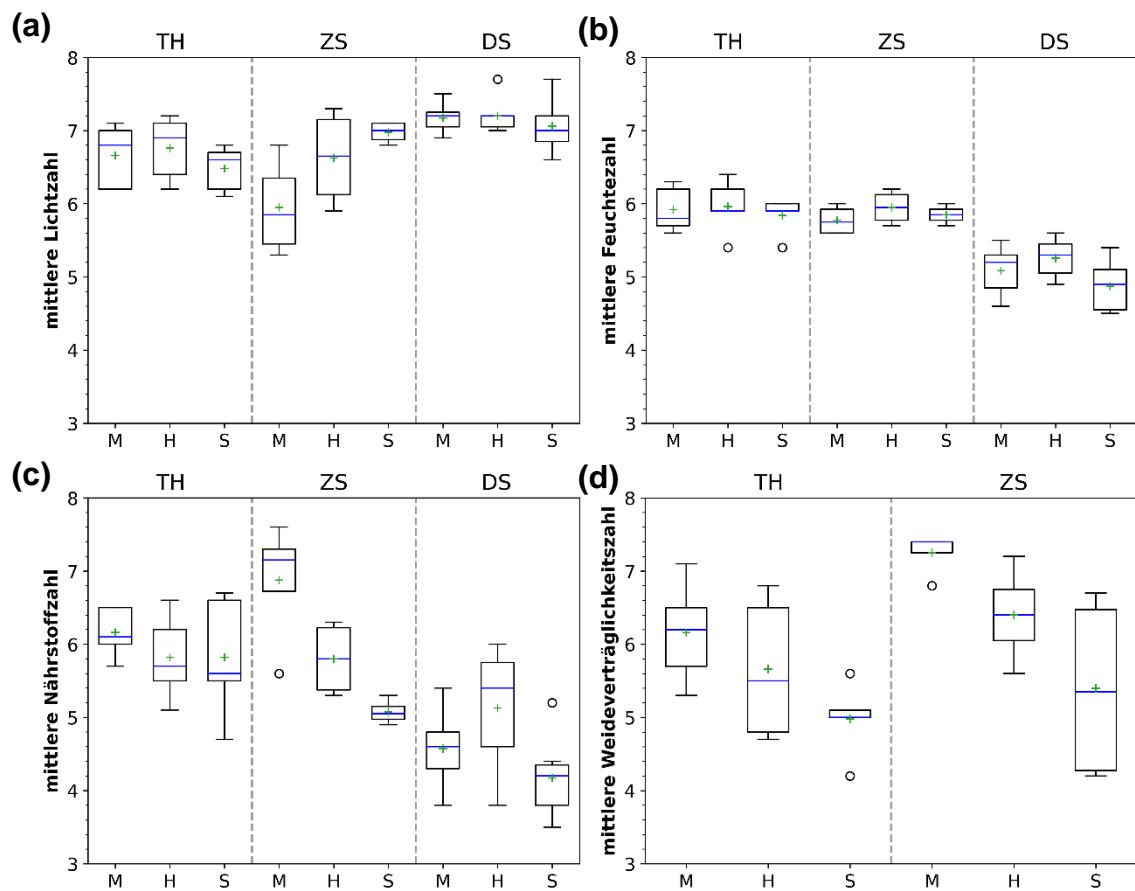


**Abb. 9:** Boxplots der Parameter für die Vegetationsstruktur für die einzelnen PV-Anlagen gruppiert nach den Flächentypen: (a) Deckung der Krautschicht (%), (b) Höhe der Krautschicht (cm), (c) Deckung der Moosschicht (%), (d) Deckung der Streuschicht (%); M – unter dem Modul, H – an der Oberkante des Moduls, S – zwischen den Modulen. PV-Anlagen: TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune 2; DS – Davidschacht; blaue Linie – Median, grünes Kreuz – arithmetisches Mittelwert.

**Fig. 9:** Boxplots of the parameters for the vegetation structure for the three PV parks grouped by the plot type: (a) coverage of herb layer (%), (b) height of herb layer (cm), (c) coverage of moss layer (%), (d) coverage of litter layer (%); M – under modules; H – at the upper edge of the modules; S – between modules. PV park: TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune 2; DS – Davidschacht; blue line – median; green line – arithmetic mean.

Die höhere mittlere Stickstoffzahl auf den Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune (Tabelle 4) ist zum einen standortbedingt (s. Kap. 2.3), wird aber vermutlich durch eine Nährstoffanreicherung aus dem Schafskot durch die Beweidung zusätzlich erhöht. Die ohnehin schon mageren Bedingungen der Anlage Davidschacht werden in Folge des Abtransports des Mahdgutes nach der Mahd noch verstärkt (vgl. Briemle et al. 1991), wodurch die geringeren mittleren Stickstoffzahlen erklärbar werden (Tabelle 4). Diese unterschiedliche Nährstoffversorgung der Anlagen erklärt auch die insgesamt geringeren Vegetationsdeckungen, Wuchshöhen und Abundanzsummen der Anlage Davidschacht im Vergleich zu den anderen beiden Anlagen (Tabelle 4). Weitere Effekte der unterschiedlichen Standortbedingungen und Nutzungen können auch für das Verhältnis der Nicht-Grasarten zu Grasarten beschrieben werden: Während die feuchteren und beweideten Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune eher durch Grasarten gekennzeichnet waren, zeichnete sich die Anlage Davidschacht durch einen deutlich höheren Anteil an Nicht-Grasarten wie Kräutern aus (Tabelle 4).

Die Ergebnisse der **vegetationskundlichen Analysen** (Tabelle A1) zeigten entsprechend, dass in der Anlage Davidschacht mehr Magerkeits- und Trockenheitszeiger wie *Hypochaeris radicata* und *Pilosella officinarum* vorkamen, während das Vorkommen von Feuchtezeigern wie *Juncus effusus* und *Achillea ptarmica* (Tabelle A1, A2) die etwas feuchteren Standortbedingungen der Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune widerspiegelt (vgl. Tabelle 4). Darüber hinaus hatte die unterschiedliche Nutzung einen Einfluss auf die Artenzusammensetzung: Für die beweideten Anlagen Tannenhübel und Ziegelscheune wurde eine *Poa pratensis-Alopecurus pratensis* Gesellschaft identifiziert, wohingegen die Aufnahmen der gemähten Flächen der Anlage Davidschacht zu einer *Trifolium pratense-Achillea millefolium*-Gesellschaft (Tabelle A1) gestellt wurden. Die *Poa pratensis-Alopecurus pratensis*-Gesellschaft zeichnet sich durch Arten nährstoffreicher, mild bis mäßig saurer Standorte aus. Auf der Mehrzahl der Flächen der Anlage Tannenhübel kam sie in der Ausprägung mit der Pionierpflanze *Agrostis stolonifera* vor. Dies weist darauf hin, dass die Vegetationsentwicklung auf der Anlage Tannenhübel aufgrund des jungen Alters der Anlage noch am Anfang steht.



**Abb. 10:** Boxplots der mittleren gewichteten Ellenberg-Zeigerwerte für (a) Licht, (b) Feuchte, (c) Stickstoff und (d) der mittleren Weideverträglichkeit (nur für die beweideten Anlagen) für die einzelnen Anlagen gruppiert nach Flächentypen: M – unter dem Modul, H – an der Oberkante des Moduls, S – zwischen den Modulen; TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune 2; DS – Davidschacht; blaue Linie – Median, grünes Kreuz – arithmetisches Mittelwert.

**Fig. 10:** Boxplots of the mean weighted Ellenberg indicator values for (a) light, (b) moisture, (c) nitrogen, (d) the mean grazing tolerance value (only for grazed parks) for the three PV parks grouped by the plot type: M – under modules; H – at the rear upper of the modules; S – between modules; TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune 2; DS – Davidschacht; blue line – median; green cross – arithmetic mean.

Die Ausprägungen nährstoffreicher Standorte mit *Urtica dioica* bzw. feuchter Standorte mit *Juncus effusus* kamen auf ähnlich vielen Flächen der Anlage Ziegelscheune vor und spiegeln somit die Bodenbedingungen (Stauwasserböden, nährstoffreich) wider. In allen drei Anlagen zeigte sich, dass sich die Mehrzahl der nicht vom Modul beeinflussten Flächen (S) von den modulbeeinflussten Flächen (M, H) in der Ausprägung der anlagen-eigenen Pflanzengesellschaft unterschieden (vgl. Abb. 4, Abb. 5). Neben der Bedeutung der Standortfaktoren und der Nutzung konnte auch eine Artengruppe bestehend u. a. aus *Galium album* und *Cerastium holosteoides* identifiziert werden, welche vorwiegend auf den beiden älteren Anlagen Ziegelscheune und Davidschacht vorkam (Tabelle A1/17-48, Tabelle A2). Mit geringeren Häufigkeiten kamen einige Arten dieser Gruppe auch auf der jüngeren Anlage Tannenhübel vor. Die beiden älteren Anlagen zeigten in den Shinozaki-Kurven zudem jeweils höhere Artenzahlen als die jüngere Anlage Tannenhübel (Abb. 6), so dass das Alter der Anlage einen Effekt auf die Artenvielfalt hat (längere Besiedelungszeit). Da sich die Effekte der Faktoren Standortbedingungen, Nutzung und Alter auf die Vegetation überschneiden, können aus der hier durchgeführten Untersuchung von nur drei unterschiedlich ausgeprägten Anlagen keine allgemeinen Muster abgeleitet werden.

## 5.2 Einfluss der Photovoltaik-Module auf die Vegetation und bestimmte Standortbedingungen

### 5.2.1 Bedeutung der Photovoltaik-Module für die standörtliche Ausbildung

Um die Bedeutung des durch die Module bedingten Beschattungs- und Niederschlagsgradienten auf die Vegetation zu analysieren, wurden in der vorliegenden Arbeit Flächentriplets angelegt (vgl. Abb. 3). Ein Ziel war dabei, mögliche Veränderungen der Standortbedingungen durch die Module anhand der Veränderung der mittleren **Ellenberg-Zeigerwerte** innerhalb der Triplets zu untersuchen.

Die **mittlere Lichtzahl** sollte den Beschattungsgradienten innerhalb der Triplets vom Modul zum Reihenzwischenraum abbilden ( $M < H < S$  in Abb. 3). Vervloesem et al. (2022) fanden tatsächlich eine höhere Lichtzahl im Reihenzwischenraum im Vergleich zu Flächen unter Modulen. Dies war in den vorliegenden Untersuchungen nur für die Anlage Ziegelscheune der Fall (Abb. 10a). Auf der Anlage Davidschacht ergaben sich dagegen kaum Unterschiede bezüglich der mittleren Lichtzahl innerhalb der Triplets (Abb. 10a). Allerdings wiesen die Module in der Anlage Davidschacht sowohl den größten Reihenabstand (7 m) als auch die höchste Modulhöhe (untere Kante: 1,30 m) auf (Tabelle 1), so dass auch die Flächen unter den Modulen über den Tag hinweg bei schräg stehender Sonne mehr Licht erhielten (vgl. Abb. 2e,f und Abb. 3i,h) und die mittleren Lichtzahlen sich im Mittel kaum unterschieden (Abb. 10a). Uldrijan et al. (2022) fanden auf einer PV-FFA in der Tschechischen Republik ebenfalls einen höheren Flächenanteil an lichtanspruchsvollen Pflanzen im Bereich unter den Modulen. Dies wird mit einer geringeren Konkurrenz unter den Modulen (geringe durchschnittliche Vegetationsdeckung) und der Kompensation durch andere Einflussfaktoren begründet.

Anhand der **mittleren Stickstoffzahlen** können die Anlagen Ziegelscheune und Tannenhübel als mäßig stickstoffreiche bis stickstoffreiche Standorte beschrieben werden (s. o., Tabelle 4, Abb. 10c). Beide Standorte wiesen eine höhere mittlere Stickstoffzahl für die unter den Modulen gelegenen Flächen auf ( $M$  in Abb. 10c). Dies ist vermutlich auf einen indirekten Effekt der Module zurückzuführen, da die beschatteten Flächen ( $M$  und  $H$ ) von den Schafen an heißen Sommertagen verstärkt als Ruheplatz genutzt wurden und sich hier bei der Begehung der Anlage die Mehrzahl der Trampelpfade zeigten (Zappek et al. 2024, unpubl.), wodurch sich das Stickstoffangebot auf diesen Flächen durch den Eintrag von Dung erhöht. Dies ist auch an der im Mittel höheren Weideverträglichkeit auf den beschatteten Flächen ( $M$  und  $H$ ) der beweideten Anlage Ziegelscheune zu erkennen (Abb. 10d). Auf der Anlage Ziegelscheune wurde der Nährstoffreichtum dieser beiden Flächentypen durch das Vorkommen des Nährstoffzeigers *Urtica dioica* unterstrichen (Tabelle A1/Spalten 22-27). Auch die Anlage Davidschacht wies im Vergleich zu den besonnten Flächen ( $S$ ) auf den direkt vom Modul beeinflussten Flächen ( $M$ ) eine leicht und auf den teilweise beschatteten Flächen des Reihenzwischenraumes ( $H$ ) eine deutlich erhöhte mittlere Stickstoffzahl auf (Abb. 10c). Vervloesem et al. (2022) fanden bei der Untersuchung von 10 Solarparks in Italien, dass die Stickstoffzahl unter den Modulen höher war als in den Reihenzwischenräumen. Dies wird dabei mit einer stärkeren Bodenstörung unter den Modulen im Zuge der Installation und des Managements der Anlage sowie des Stickstoffaustauschs auf den vom Regen beeinflussten Flächen im Reihenzwischenraum begründet.

Bai et al. (2022), Vervloesem et al. (2022) und Armstrong et al. (2016) fanden auf den Flächen unter den Modulen im Vergleich zu denen des Reihenzwischenraumes eine leicht erhöhte **Bodenfeuchte**. Diese wird von Armstrong et al. (2016) damit erklärt, dass Regenwasser an den Modulgestellen und -kanten hinabläuft und so auf die Flächen unter den Modulen gelangt (Abb. 11). Diese höhere Feuchte unter den Modulen ( $M$ ) im Vergleich zum Zwischenraum ( $S$ ) konnte anhand der mittleren Feuchtezahlen in der vorliegenden Arbeit nur für die Anlage Davidschacht gefunden werden (Abb. 10b). Armstrong et al. (2016) führten allerdings ganzjährige Bodenfeuchtemessungen durch, mit denen auch kleinere Unterschiede in der Feuchte erfasst werden konnten. In der vorliegenden Arbeit wurde die Bodenfeuchte über die vorkommenden Arten und deren Ellenberg-Zeigerwerte abgeleitet, wobei Moose nicht in die Berechnung einbezogen wurden. Somit können auch etwaige Effekte einer verringerten Evaporation (Bai et al. 2022) unter den Modulen aufgrund der verringerten Sonneneinstrahlung nicht quantifiziert werden. Lambert et al. (2023) fanden, dass die Abschattung von Niederschlag und die verringerte Evapotranspiration unter den Modulen in nicht signifikanten Effekten auf die Bodenfeuchte resultierten. In dieser Arbeit zeigten die noch beschatteten, aber nicht vor Niederschlag geschützten Untersuchungsflächen an der Oberkante der Module ( $H$ ) tendenziell die höchsten mittleren Feuchtezahlen (Abb. 10b).

## 5.2.2 Bedeutung der Photovoltaik-Module für Artenvielfalt und Vegetationsausbildung

Bai et al. (2022) fanden, dass Photovoltaikmodule aufgrund der verringerten Sonneneinstrahlung, die Boden-temperatur reduzieren und dadurch eine höhere **Artenvielfalt** unter den Modulen im Vergleich zu den Zwischenräumen fördern. In Übereinstimmung mit dieser Studie zeigten die von Modulen bedeckten Flächen in der vorliegenden Untersuchung für die Anlagen Davidschacht und Tannenhübel eine höhere  $\gamma$ - und  $\alpha$ -Diversität als die nicht von Modulen bedeckten Flächen (Abb. 7a, c). Für die Anlage Davidschacht ist außerdem zu erkennen, dass die Artenzahl entlang des Beschattungsgradienten zu den besonnten Flächen hin abnimmt (Abb. 7c, Abb. 8a). In der Anlage Ziegelscheune zeigte sich ein anderes Bild: Hier waren die Artenzahlen und die aus der Shinozaki-Kurve ermittelte Diversität des Flächentyps  $M$  deutlich geringer als die des Flächentyps  $S$  (Abb. 7b, Abb. 8a); der Flächentyp  $H$  war näher an den Werten des Flächentyps  $S$ . Somit ergibt sich für die Anlage Ziegelscheune, dass die von den Modulen überdeckten Flächen eine geringere Diversität als die nicht vom Modul bedeckten Flächen aufwies (vgl. Abb. 7a). Dies kann, aufgrund des höheren Nährstoffgehaltes, durch das Vorkommen der konkurrenzstarken Art *Urtica dioica* bedingt sein. Vervloesem et al. (2022) fanden, dass sowohl die Artenzahl als auch die Shannon-Diversität im Mittel unter den Modulen geringer war als zwischen den Reihen. Diese Trends können mit der Beschattung und somit geringeren Menge an photosynthetisch aktiver Strahlung und/oder mit einem intensiveren Management unter den Modulen, um Schäden durch die Vegetation zu vermeiden, zu erklären sein. Die auch von Armstrong et al. (2016) auf einer Anlage im Vereinigten Königreich und von Lambert et al.

(2023) auf 10 Anlagen in Süd-Frankreich nachgewiesene geringere Artenzahl unter den Modulen konnte in den vorliegenden Untersuchungen nur für die Anlage Ziegelscheune bestätigt werden. Dabei können aber unterschiedliche Standortfaktoren, Nutzungsformen und technische Parameter der Anlage eine Rolle spielen. Die von Armstrong et al. (2016) untersuchte Anlage wurde, ebenso wie die Anlage Ziegelscheune, beweidet. Über alle Anlagen betrachtet konnten in der vorliegenden Untersuchung sogar eine deutlich höhere Diversität auf den Flächen unter den Modulen festgestellt werden als auf denen im Reihenzwischenraum (Abb. 7d).

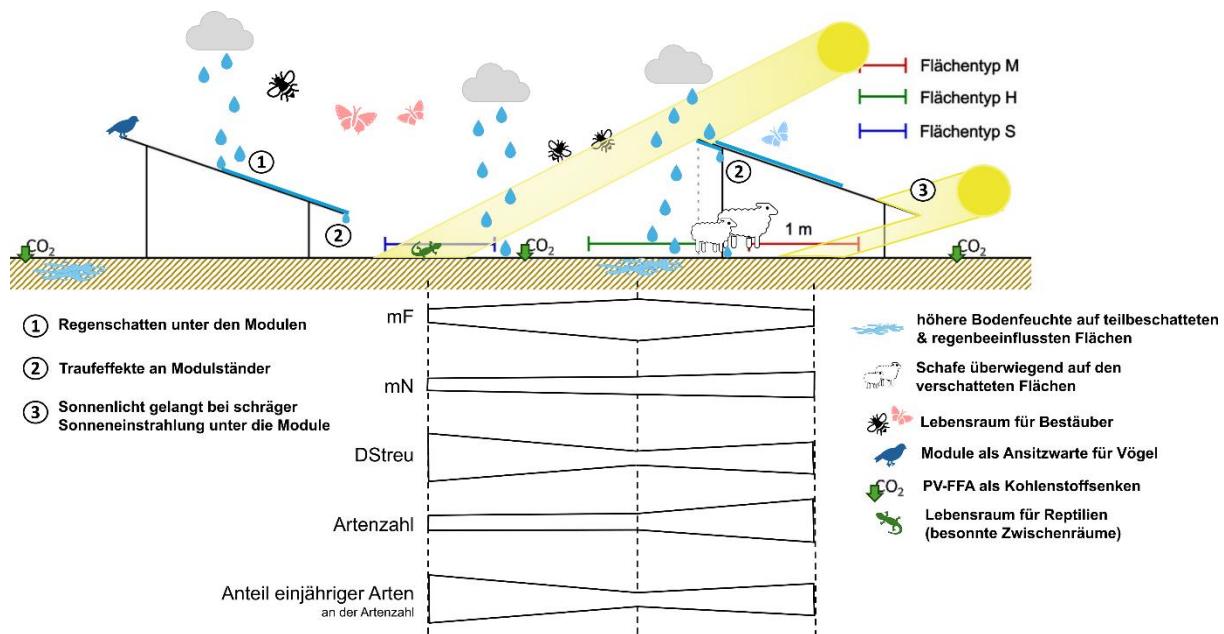
Die von Bai et al. (2022) beschriebenen Veränderungen des Mikroklimas (s. o.) können sich auf die Artenzusammensetzung und den Anteil bestimmter **Lebensformen** auswirken: So haben beispielsweise schnellwachsende und größere Gräser einen stärkeren Vorteil gegenüber kleineren oder langsam wachsenden Gräsern, da sie in schattigen Bereichen ihre Lichtaufnahmekapazität durch Biomasseaufbau schneller erhöhen können. Bai et al. (2022) fanden, dass das Wachstum von mehrjährigen Sauерgräsern, mehrjährigen Stauden sowie einjährigen und mehrjährigen krautigen Arten durch die Module begünstigt wurde. Vaverková et al. (2022) konnten zeigen, dass die Module günstigere Bedingungen für ausgewählte mehrjährige krautige Pflanzen und annuelle Gräser schaffen können. Bei den vorkommenden Arten handelte es sich überwiegend um trockenresistente und schattentolerante Arten. Des Weiteren fanden Vaverková et al. (2022), dass nachgeführte (rotierende) Anlagen das Vorkommen von annuellen krautigen Arten und von Arten der Gattung *Trifolium* begünstigen. Einen erhöhten Anteil mehrjähriger Arten an der Artenzahl unter den Modulen konnte in den vorliegenden Untersuchungen nur für die Anlage Ziegelscheune gezeigt werden (Abb. 8d). Die Anlagen Tannenhübel und Davidschacht zeigten dagegen einen höheren Anteil mehrjähriger Arten (z. B. Hemikryptophyten) im von Modulen beeinflussten Bereich des Reihenzwischenraumes (H in Abb. 8d). Während Uldrijan et al. (2022) bei der Untersuchung einer Photovoltaik-Freiflächenanlage in Tschechien einen höheren Anteil einjähriger Arten unter den Modulen als abseits der Module fanden, zeigt sich bei den vorliegenden Untersuchungen auf den Anlagen Ziegelscheune und Davidschacht ein leicht höherer Anteil der Therophyten und somit einjährigen Arten auf den Flächen des Reihenzwischenraumes (S) (Abb. 8c). Armstrong et al. (2016) fanden, dass die Flächen unter den Modulen von Gräsern dominiert wurden und die Flächen im Zwischenraum eher von Nicht-Grasarten. Dies wird damit begründet, dass Grasarten besser mit den schattigen Bedingungen unter den Modulen zureckkommen. In den vorliegenden Daten zeigte sich, dass die Anlage Tannenhübel auf allen Flächen vorwiegend durch Gräser bestimmt war und die Anlage Davidschacht durch Nicht-Grasarten, auch unter den Modulen (Abb. 8b). Die besonnten Flächen der Anlage Tannenhübel wiesen jedoch ein leicht erhöhtes Verhältnis (Abb. 8b) und somit eine etwas höhere Anzahl von Nicht-Grasarten als unter dem Modul auf. Die Anlage Ziegelscheune zeigte das von Armstrong et al. (2016) beschriebene Muster (Abb. 8b). Graham et al. (2021) fanden, dass die halb-beschatteten Flächen einen erhöhten Blütenreichtum sowie einen verzögerten Blühzeitpunkt aufwiesen. Bestäuber profitieren dadurch von einem länger anhaltendem Nahrungsangebot (Graham et al. 2021).

Die **Deckung** der Moosschicht war auf allen Anlagen auf den teilweise beschatteten, aber nicht vor Niederschlag geschützten Untersuchungsflächen (H) am höchsten (Abb. 9c). Die geringere Deckung der Streuschicht der beschatteten Flächen (Flächentyp M und H) im Vergleich zum voll besonnten Typ S auf allen Anlagen (Abb. 9d) könnte mit der hohen Sonneneinstrahlung auf diesen Flächen in Zusammenhang stehen, in dessen Folge die Arten entweder schon früher im Jahr abblühen oder zumindest der Blütenstand abstirbt oder aufgrund von Strahlungs- und Trockenstress allgemein absterben und sich dadurch die Streudeckung auf den besonnten Flächen erhöht.

### 5.3 Bedeutung von PV-FFA für den Naturschutz

Die vorliegende Arbeit hat die Beschreibung der Vegetation auf unterschiedlich alten und unterschiedlich genutzten PV-Anlagen und die Analyse des Einflusses der Photovoltaik-Module auf die kleinräumige Vegetationsausbildung zum Ziel. In Abb. 11 sind die wichtigsten Ergebnisse der eigenen Untersuchungen zusammen mit naturschutzfachlich bedeutsamen Sachverhalten aus Literaturauswertungen schematisch dargestellt. Da die drei untersuchten Anlagen zum Teil voneinander abweichende Ergebnisse zeigen, wurden in die Abbildung nur die Ergebnisse aufgenommen, die aus mindestens zwei Anlagen gewonnen wurden. Auf dieser Basis soll im Folgenden auf die naturschutzfachliche Bedeutung von PV-FFA und auf die Ableitung entsprechender Handlungsempfehlungen für das Management eingegangen werden.

Hinsichtlich der **Artenvielfalt** führen Photovoltaik-Freiflächenanlagen zu einer deutlichen Verbesserung im Vergleich zu vormals intensiv genutztem Ackerland (vgl. Montag et al. 2016; Peschel & Peschel 2025) oder artenarmen Mähwiesen, wodurch der Aufbau einer PV-FFA an entsprechenden Standorten einen Gewinn für die Biodiversität darstellen kann. Durch die Teilhabe der Landwirte an den PV-FFAs bzw. die Förderung ihrer Errichtung in der Agrarlandschaft kann der Anreiz zur Umwidmung erhöht werden (vgl. Montag et al. 2016). Bei der Nutzung ertragsschwacher Böden besteht zudem keine erhebliche Flächenkonkurrenz zur Nahrungsmittelproduktion (vgl. Montag et al. 2016). Peschel & Peschel (2025) konnten bei einer Untersuchung von 31 PV-FFA zeigen, dass die Biodiversität bereits direkt nach Inbetriebnahme von PV-FFA auf Ackerland ansteigt. PV-FFA stellen aufgrund ihrer Strukturvielfalt Lebensraum für Arten des Offenlandes (Wege, Zwischenräume in der Anlage), der Vorwälder und Wälder (Bereich unter v. a. südexponierten Modulen) sowie der Übergangsbereiche zwischen offenen und geschlossenen Standorten dar (Peschel & Peschel 2025).



**Abb. 11:** Übersichtsgrafik zur Veranschaulichung der Bedeutung von PV-Anlagen als Lebensraum für Tier- und Pflanzenarten und für die Wirkung der Module auf die kleinräumigen Vegetationsausprägungen und Standortverhältnisse. Neben den Ergebnissen der vorliegenden Arbeit werden Angaben aus Literaturquellen dargestellt (aus Zappek 2024, unpubl.).

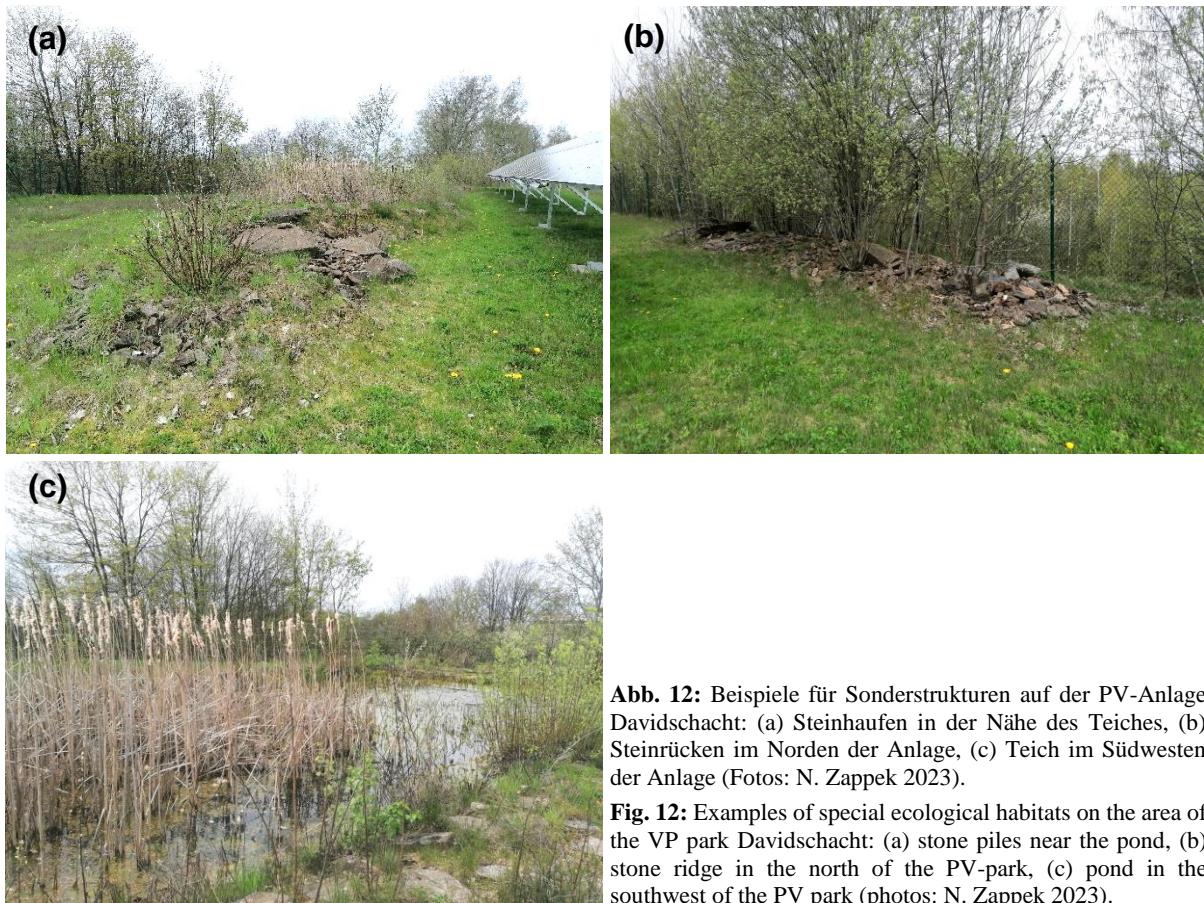
**Fig. 11:** Overview graphic illustrating the importance of PV parks as habitats for animal and plant species and the effect of the modules on small-scale vegetation characteristics and site conditions. In addition to the results of this study, information from literature sources is also presented (from Zappek 2024, unpubl.).

Um bestmöglich Synergieeffekte zwischen den verschiedenen Artengruppen zu nutzen und eine hohe Biodiversität auf den Anlagen zu erhalten, sollte auf eine hohe Nischendiversität und Strukturvielfalt in der Anlage geachtet werden (vgl. Graham et al. 2021; Peschel & Peschel 2025). Im Agrarland bilden extensiv genutzte Photovoltaik-Freiflächenanlagen **Trittsteinbiotope** für Kleinsäuger, Insekten, Vögel und verschiedene Pflanzenarten (Peschel et al. 2019; BfN 2020; Blaydes et al. 2021) und können Rückzugsräume für gefährdete Arten und für Arten mit hohem Schutzstatus darstellen (Nowak et al. 2023). Auch wenn auf den untersuchten Anlagen nach bis zu 14 Jahren Entwicklungszeit (Anlage Davidschacht) noch keine geschützten oder gefährdeten Pflanzenarten nachgewiesen wurden, schließt dies nicht aus, dass dies nicht für Vertreter unterschiedlicher Tiergruppen zutrifft, die sich auf PV-FFA finden lassen. So konnte Scheuermann (2025, unpubl.) im Rahmen der Erhebung der Heuschreckenfauna in den Anlagen Davidschacht und Ziegelscheune im Jahr 2024 mit der Gefleckten Keulenschrecke (*Myrmeleotettix maculatus*) und der Langfühler-Dornschrecke (*Tetrix tenuicornis*) zwei Arten nachweisen, die auf der Vorwarnliste zur Roten Liste Deutschlands stehen (Poniatowski et al. 2024). Bestimmte Vogelarten nutzen beispielweise die Module als Ansitzwarte (Peschel et al. 2019) (Abb. 11) und PV-FFA bieten im Vergleich zur Agrarlandschaft ein reichhaltiges Nahrungsangebot (Insekten) für Vögel dar (Peschel & Peschel 2025). Somit finden sich in Photovoltaik-Freiflächenanlagen nicht nur Brutvögel, sondern auch Nahrungsgäste (Peschel & Peschel 2025). Für Reptilien können PV-Anlagen als Quellhabitatem und Lebensräume dienen (Abb. 11). Hierbei spielt die Breite des besonnten Reihenzwischenraumes eine wesentliche Rolle für die Populationsdichten, wobei dieser mindestens 3 m betragen sollten (Peschel et al. 2019). Die Reihenzwischenräume der in der vorliegenden Arbeit untersuchten Anlagen nahm von der ältesten Anlage Davidschacht (7 m) hin zur jüngsten Anlage Tannenhübel (3 m) ab (Tabelle 1).

Die **Unterwuchsvegetation** von PV-FFA bietet Habitate und Nahrung für Blütenbestäuber (Blaydes et al. 2021, 2022) (Abb. 11) und kann so dem bestehenden Insektenrückgang entgegenwirken (Blaydes et al. 2022; Peschel et al. 2019; Graham et al. 2021). Im vorliegenden Datenmaterial war der Anteil an krautigen Blütenpflanzen an der Gesamtartenzahl auf der Anlage Davidschacht am höchsten (Abb. 8b). Neben dem Alter der Anlage spielt hierfür sehr wahrscheinlich die Nährstoffarmut der Substrate (Abb. 10c) eine entscheidende Rolle, was auf der Anlage Davidschacht zu einem niedrigwüchsigen (Abb. 9b) und weniger dichten (Abb. 9a) Bewuchs führte, weshalb weniger konkurrenzstarke, niedrigwüchsige Blütenpflanzen wie *Lotus corniculatus*, *Pilosella officinarum* und *Hypochaeris radicata* vorkamen (Tabelle A1). Dennoch lag die Gesamtartenzahl der Anlage Davidschacht etwas unterhalb der Gesamtartenzahl der etwas jüngeren, aber beweideten Anlage Ziegelscheune, wenn man gleich viele Aufnahmeflächen zugrunde legt (Tabelle 3, Abb. 6). Die mittlere Artenzahl pro Aufnahmefläche war dagegen in der Anlage Davidschacht etwas höher (Tabelle 3).

Die Planung von Maßnahmen zur Unterwuchsbewirtschaftung sollte daher generell standortbezogen, also unter Berücksichtigung der Ausprägung der vorhandenen Vegetation und von Bodeneigenschaften und Klima erfolgen. Nach der intermediate disturbance-Hypothese (z. B. Wohlgemuth et al. 2019) entwickelt sich die höchste Artenzahl eines Systems bei einer mittleren Störungsfrequenz und Störungsstärke. Ziel der Unterwuchsbewirtschaftung von PV-Anlagen ist i.d.R. die Vermeidung der Beschattung der Module, was häufig durch eine 2-3malige Mahd ohne Düngung bzw. eine extensive Beweidung mit Schafen angestrebt wird, was einer mittleren Störung entspricht. PV-FFA können nicht nur für die Biodiversität positive Wirkungen haben sondern, wie Carvalho (2021) beschreibt, kann die Unterwuchsvegetation von PV-Anlagen bei einem aktiven Grünlandmanagement durch die Gabe von organischem Dünger, Schafbeweidung und die Ansaat bestimmter Arten die **Kohlenstoffbindung** im Boden erhöhen (Abb. 11) und damit einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Im Fall der Installation einer PV-FFA müssen als Folge der Flächeninanspruchnahme **Ausgleichs- und Ersatzmaßnahmen** erfolgen (BfN 2020). Eine Umsetzung entsprechender Maßnahmen im Randbereich der Photovoltaikanlage kann die Struktur- und Lebensraumvielfalt und somit die Biodiversität erhöhen (Peschel et al. 2019). Im Fall der Anlage Davidschacht wurden beispielsweise ein niederschlagsgespeister Teich und ein Lesesteinrücken angelegt (Abb. 12). Um unnötige Flächeninanspruchnahme und damit einhergehende Flächenkonflikte zu vermeiden, sollte der Ausbau von Photovoltaik-Freiflächenanlagen bevorzugt auf bereits versiegelten Flächen stattfinden (BfN 2020). **Geeignete Flächen** können auch, wie die PV-FFA Davidschacht zeigt, ehemalige Berge-/Abraumhalden sein. Zudem weisen Photovoltaik-Freiflächenanlagen Potential zur Wiederherstellung von degradiertem Grünland auf (vgl. Nowak et al. 2023) und könnten, um die Flächeninanspruchnahme zu verringern, dort eingesetzt werden. Eine Vielzahl weiterer naturschutzfachlicher Effekte kann den hier zitierten Arbeiten und der Literaturrecherche von Schlegel (2021) entnommen werden.



**Abb. 12:** Beispiele für Sonderstrukturen auf der PV-Anlage Davidschacht: (a) Steinhaufen in der Nähe des Teiches, (b) Steinrücken im Norden der Anlage, (c) Teich im Südwesten der Anlage (Fotos: N. Zappek 2023).

**Fig. 12:** Examples of special ecological habitats on the area of the VP park Davidschacht: (a) stone piles near the pond, (b) stone ridge in the north of the PV-park, (c) pond in the southwest of the PV park (photos: N. Zappek 2023).

## 6. Summary

In this study three ground-mounted photovoltaic parks (PV-FFA) in the vicinity of Freiberg (Saxony) were examined with regard to the influence of the shading and precipitation gradient generated by the modules on the vegetation. For this purpose, relevés in plot triplets (under the module, at the rear edge of the modules, between module rows) were established. A total of 84 plant species and two plant association with four or two subtypes were recorded in the three parks. The *Poa pratensis*-*Alopecurus pratensis* community was found on the grazed and also more humid and nutrient-rich parks Tannenhübel and Ziegelscheune. In contrast, the *Trifolium pratense*-*Achillea millefolium* community was identified for the Davidschacht park, which was established on tailings from historic mining. The young Tannenhübel park was characterized by the pioneer species *Agrostis stolonifera* in the majority of the study plots, indicating that the ongoing development of the vegetation composition. The module-influenced areas and the non-module-influenced areas showed different plant community characteristics at all three sites. The results of the analysis of the Ellenberg indicator values show that site conditions such as soil moisture and nutrient availability had a more significant influence on the vegetation than the age of the system. The mean Ellenberg indicator values for light did not reflect the shading gradient assumed to be caused by the modules. A clear influence of the modules on the vegetation across all parks was evident only in a few parameters: Soil moisture was highest in the rain-exposed areas between the modules and at the edges of the modules. The areas under the modules exhibited higher overall diversity than the areas between the rows. These sunny areas had the highest proportion of annual species in the total number of species, and they also exhibited the highest values for litter cover. An indirect influence of the modules was observed by sheep grazing, which preferred to stay in the shaded areas beneath the modules and contributed to an increase in nutrient availability in these areas by deposition of feces. Overall, the studies show that PV-FFA can provide habitats for many plant species and that the modules can contribute to small-scale differences in site characteristics, which in turn affect plant species composition.

## Danksagung

Unser Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Roland Grütze für den Zugang zur Anlage „Davidschacht“ und die hilfreichen Informationen zum Bau und der Bewirtschaftung der Anlage. Weiterer Dank gilt Frau Susanne Koschker von der Energiegenossenschaft Neue Energien Ost Sachsen eG (egNEOS) für den Zugang zum Bürgersolarpark Tannenhübel. Ebenso danken wir den Herren Benedikt Klein (UmweltBank AG), Waldemar Bien (Solarparc GmbH) und Patrick Fritzsch (Solarparc GmbH) für den Zugang zur Anlage Ziegelscheune 2.

## 7. Literatur

- Achziger, R., Nigmann, U. & Zwölfer, H. (1992): Rarefaction-Methoden und ihre Einsatzmöglichkeiten bei der zoökologischen Zustandsanalyse und Bewertung von Biotopen. Zeitschrift für Ökologie und Naturschutz 1: 89-105.
- Aichele, D., Schwegler, H.-W. & Hofmann, R. (1998): Unsere Gräser: Süßgräser, Sauergräser, Binsen. 11. Aufl., Franckh-Kosmos, Stuttgart.
- Armstrong, A., Ostle, N.J. & Whitaker, J. (2016): Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. Environmental Research Letters 11: 074016. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/7/074016>.
- Bai, Z., Jia, A., Bai, Z., Qu, S., Zhang, M., et al. (2022): Photovoltaic panels have altered grassland plant biodiversity and soil microbial diversity. Frontiers in Microbiology 13: 1065899. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.1065899>.
- BfN (Bundesamt für Naturschutz) (Hrsg.) (2020): Erneuerbare Energien Report. 3. Aufl., Bonn, Bad Godesberg.
- Blaydes, H., Gardner, E., Whyatt, J.D., Potts, S.G. & Armstrong, A. (2022): Solar park management and design to boost bumble bee populations. Environmental Research Letters 17: 044002. DOI: <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac5840>.
- Blaydes, H., Potts, S.G., Whyatt, J.D. & Armstrong, A. (2021): Opportunities to enhance pollinator biodiversity in solar parks. Renewable and Sustainable Energy Reviews 145: 111065. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111065>.
- BMWK (Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz) (2023): Photovoltaik-Strategie. URL: [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/photovoltaik-strategie-2023.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=8](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/photovoltaik-strategie-2023.pdf?__blob=publicationFile&v=8) (letzter Zugriff: 21.11.2023).
- Briemle, G., Eickhoff, D. & Wolf, R. (1991): Mindestpflege und Mindestnutzung unterschiedlicher Grünlandtypen aus landschaftsökologischer und landeskultureller Sicht: praktische Anleitung zur Erkennung, Nutzung und Pflege von Grünlandgesellschaften. Beihefte zu den Veröffentlichungen für Naturschutz und Landschaftspflege in Baden-Württemberg 60: 1-106.
- Briemle, G., Nitsche, S. & Nitsche, L. (2002): Nutzungs-wertzahlen für Gefäßpflanzen des Grünlandes. Schriftenreihe für Vegetationskunde 38: 203-225.
- Carvalho, F. (2021): Solar parks could become significant carbon stores: Active grassland management with organic fertiliser, sheep grazing and seeding could increase the amount of carbon stored in grassland soils. URL: <https://zenodo.org/record/5578083> (letzter Zugriff: 08.03.2024).
- Dierschke, H. (1994): Pflanzensoziologie: Grundlagen und Methoden. Ulmer, Stuttgart.
- Durka, W. & Ackermann, W. (1993): SORT - Ein Computerprogramm zur Bearbeitung von floristischen und faunistischen Artentabellen. Natur und Landschaft 68: 16-21.
- Ellenberg, H. & Leuschner, C. (2010): Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen: in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht. 6. Aufl., Ulmer, Stuttgart.

- Fritz, E. & Jahns, C. (2017): Die Spülhalde Davidschacht in Freiberg – Geschichte, Umweltproblematik und geplante Sanierung. *Freiberg Ecology online* 2: 4-17.
- Funke, L., Schulze, C. & Achtziger, R. (2017): Untersuchungen zur Biodiversität der Wanzen (Heteroptera) und Zikaden (Auchenorrhyncha) in den Offenlandbiotopen der Spülhalde Davidschacht in Freiberg (Sachsen). *Freiberg Ecology online* 2: 66-83.
- Gómez-Catasús, J., Morales, M.B., Giralt, D., del Portillo, D.G., Manzano-Rubio, R., Solé-Bujalance, L., Sardà-Palomera, F., Traba, J. & Bota, G. (2024): Solar photovoltaic energy development and biodiversity conservation: Current knowledge and research gaps. *Conservation Letters* 17: e13025. DOI: <https://doi.org/10.1111/conl.13025>.
- Graham, M., Ates, S., Melathopoulos, A.P., Moldenke, A.R., DeBano, S.J., Best, L.R. & Higgins, C.W. (2021): Partial shading by solar panels delays bloom, increases floral abundance during the late-season for pollinators in a dryland, agrivoltaic ecosystem. *Scientific Reports* 11: 7452. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-021-86756-4>.
- Hernandez, R.R., Easter, S.B., Murphy-Mariscal, M.L., Maestre, F.T., Tavassoli, M., Allen, E.B., Barrows, C.W., Belnap, J., Ochoa-Hueso, R., Ravi, S. & Allen, M.F. (2014): Environmental impacts of utility-scale solar energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29: 766-779. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.08.041>.
- Jäger, E.J., Müller, F., Ritz, C.M., Welk, E. & Wesche, K. (2013): *Exkursionsflora von Deutschland: Gefäßpflanzen: Atlasband*. 12. Aufl., Spektrum Akademischer Verlag Imprint, Heidelberg.
- Joly, A., Goëau, H., Bonnet, P., Bakić, V., Barbe, J., SELmi, S., Yahiaoui, I., Carré, J., Mouysset, E., Molino, J.-F., Boujema, N. & Barthélémy, D. (2014): Interactive plant identification based on social image data. *Ecological Informatics* 23: 22-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2013.07.006>.
- Klapp, E. & Opitz von Boberfeld, W. (2011): Gräserbestimmungsschlüssel für die häufigsten Grünland- und Rasengräser. 6. Aufl., Ulmer, Stuttgart.
- Lambert, Q., Bischoff, A., Enea, M. & Gros, R. (2023): Photovoltaic power stations: an opportunity to promote European semi-natural grasslands? *Frontiers in Environmental Science* 11: 1137845. DOI: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1137845>.
- LfULG (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie) (2020a): Digitale Geologische Karte 1 : 50.000 (GK50dig). URL: [https://luis.sachsen.de/geologie/gk50.html?\\_cp=%7B%7D](https://luis.sachsen.de/geologie/gk50.html?_cp=%7B%7D) (letzter Zugriff: 05.09.2023).
- LfULG (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie) (2020b): Bodenkarte 1 : 50.000 (BK50). URL: <https://luis.sachsen.de/boden/bk50.html> (letzter Zugriff: 05.09.2023).
- LfULG (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie) (2011): Fachbeitrag zum Landschaftsprogramm - LUIS - Landwirtschaft- und Umwelt-informationsystem für Geodaten. URL: <https://luis.sachsen.de/natur/landschaftsprogramm.html> (letzter Zugriff: 05.09.2023).
- Mäder, P., Boho, D., Rzanny, M., Seeland, M., Wittich, H.C., et al. (2021): The Flora Incognita app – Interactive plant species identification. *Methods in Ecology and Evolution* 12: 1335-1342. DOI: <https://doi.org/10.1111/2041-210X.13611>.
- Magurran, A.E. (2013): *Ecological Diversity and its Measurement*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- Mannsfeld, K. & Syrbe, R.-U. (Hrsg.) (2008): *Naturräume in Sachsen*. Deutsche Akademie für Landeskunde, Leipzig.
- Montag, H., Parker, D.G. & Clarkson, T. (2016): The Effects of solar farms on local biodiversity; a comparative study. Clarkson & Woods and Wychwood Biodiversity.
- Nowak, A., Świsłowski, P., Świerszcz, S., Nowak, S., Rajfur, M., et al. (2023): Ecovoltaics - A Truly Ecological and Green Source of Renewable Goods. *Ecological Chemistry and Engineering* 30: 315-332. DOI: <https://doi.org/10.2478/eces-2023-0032>.
- Oberdorfer, E. (1994): *Pflanzensoziologische Exkursionsflora für Deutschland und angrenzende Gebiete*. 8. Aufl., Ulmer, Stuttgart.
- Oksanen, J., Simpson, G., Blanchet, F., Kindt, R., Legendre, P., Minchin, P., O'Hara, R., Solymos, P., Stevens, M., Szoces, E., Wagner, H., Barbour, M., Bedward, M., Bolker, B., Borcard, D., Borman, T., Carvalho, G., Chirico, M., De Caceres, M., Durand, S., Evangelista, H., FitzJohn, R., Friendly, M., Furneaux, B., Hannigan, G., Hill, M., Lahti, L., McGlinn, D., Ouellette, M., Ribeiro Cunha, E., Smith, T., Stier, A., Ter Braak, C. & Weedon, J. (2025): *vegan: Community Ecology Package*. R package version 2.7-0. URL: <https://vegandevs.github.io/vegan/>.
- Peschel, R. & Peschel, T. (2025): Artenvielfalt im Solarpark. Eine bundesweite Feldstudie. URL: [https://sonnen-sammeln.de/wp-content/uploads/2025\\_bne\\_Studie\\_Artenvielfalt\\_PVA.pdf](https://sonnen-sammeln.de/wp-content/uploads/2025_bne_Studie_Artenvielfalt_PVA.pdf) (letzter Zugriff: 27.04.2025).
- Peschel, R., Peschel, T., Marchand, M. & Hauke, J. (2019): Solarparks - Gewinne für die Biodiversität. URL: [https://www.bne-online.de/wp-content/uploads/20191119\\_bne\\_Studie\\_Solarparks\\_Gewinne\\_fuer\\_die\\_Biodiversitaet\\_online.pdf](https://www.bne-online.de/wp-content/uploads/20191119_bne_Studie_Solarparks_Gewinne_fuer_die_Biodiversitaet_online.pdf).
- Poniatowski, D., Detzel, P., Drews, A., Hochkirch, A., Hundertmark, I., Husemann, M., Klatt, R., Klugkist, H., Köhler, G., Kronshage, A., Maas, S., Moritz, R., Pfeifer, M.A., Stübing, S., Voith, J., Winkler, C., Wranik, W., Helbing, F. & Fartmann, T. (2024): Rote Liste und Gesamtartenliste der Heuschrecken und Fangschrecken (Orthoptera et Mantodea) Deutschlands. *Naturschutz und Biologische Vielfalt* 170: 88 S.
- R Core Team (2024): *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: <https://www.R-project.org/>.
- Scheuermann, E. (2025, unpubl.): Untersuchung des Einflusses der Modulbeschattung und der Nutzung auf die Heuschreckenfauna von zwei Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) bei Freiberg. Bachelorarbeit Studiengang Geoökologie, TU Bergakademie Freiberg, AG Biologie/Ökologie, Institut für Biowissenschaften (unpubl.).
- Schlegel, J. (2021): Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt. URL: <https://digitalcollection.zhaw.ch/server/api/core/bitstreams/2454f5b0-d2f4-44f3-8b41-e356a65c0a16/content>.
- Schmidt, P.A., Hempel, W., Denner, M., Döring, N., Gnüchtel, A., Walter, B. & Wendel, D. (2002): Potentielle Natürliche Vegetation Sachsen mit Karte 1:200.000. In: LfULG (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (Hrsg.): *Materialien zu Naturschutz und Landschaftspflege*, 230 S.

- Schulz, D. (2013): Rote Liste und Artenliste Sachsens - Farn- und Samenpflanzen. LfULG (Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie) (Hrsg.), Dresden.
- Spohn, M., Golte-Bechtle, M. & Spohn, R. (2021): Was blüht denn da? Das Original. 60. Aufl., Kosmos, Stuttgart.
- Sturchio, M.A., Macknick, J.E., Barron-Gafford, G.A., Chen, A., Alderfer, C., Condon, K., Hajek, O.L., Miller, B., Paulette, B., Siggers, J.A., Slette, I.J. & Knapp, A.K. (2022): Grassland productivity responds unexpectedly to dynamic light and soil water environments induced by photovoltaic arrays. *Ecosphere* 13: e4334. DOI: <https://doi.org/10.1002/ecs2.4334>.
- Thrän, D., Bunzel, K., Bovet, J., Eichhorn, M., Hennig, C., Keuneke, R., Kinast, P., Klenke, R., Koblenz, B., Lorenz, C., Majer, S., Manske, D., Massmann, E., Oehmichen, G., Peters, W. & Reichmuth, M. (2020): Naturschutzfachliches Monitoring des Ausbaus der erneuerbaren Energien im Strombereich und Entwicklung von Instrumenten zur Verminderung der Beeinträchtigung von Natur und Landschaft („EE-Monitor“). *BfN-Schriften* 562: 317 S.
- Uldrijan, D., Černý, M. & Winkler, J. (2022): Solar Park – Opportunity or Threat for Vegetation and Ecosystem. *Journal of Ecological Engineering* 23: 1-10. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/153456>.
- Uldrijan, D., Winkler, J. & Vaverková, M.D. (2023): Bioindication of Environmental Conditions Using Solar Park Vegetation. *Environments* 10: 86 DOI: <https://doi.org/10.3390/environments10050086>.
- Vaverková, M.D., Winkler, J., Uldrijan, D., Ogrodník, P., Vespalcová, T., Aleksiejuk-Gawron, J., Adamcová, D. & Koda, E. (2022): Fire hazard associated with different types of photovoltaic power plants: Effect of vegetation management. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 162: 112491. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112491>.
- Vervloesem, J., Marcheggiani, E., Choudhury, M.A.M. & Muys, B. (2022): Effects of Photovoltaic Solar Farms on Microclimate and Vegetation Diversity. *Sustainability* 14: 7493. DOI: <https://doi.org/10.3390/su14127493>.
- Wirth, H. (2022): Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland. URL: [www.pv-fakten.de](http://www.pv-fakten.de).
- Wittig, R. (2012): Geobotanik. 1. Aufl., Haupt Verlag, Bern, Stuttgart, Wien.
- Wohlgemuth, T., Jentsch, A. & Seidl, R. (Hrsg.) (2019): Störungsökologie. 1. Aufl., utb GmbH, Stuttgart.
- Wydra, K., Vollmer, V., Schmidt, S., Prichta, S., Kunze, R. & Aulich, H. (2022): Potential der Agri-Photovoltaik in Thüringen. Studie. URL: [https://solarinput.de/wp-content/uploads/2022/05/APV-Studie\\_19052022\\_Final.pdf](https://solarinput.de/wp-content/uploads/2022/05/APV-Studie_19052022_Final.pdf)
- Zappek, N. (2024, unpubl.): Analyse der Vegetation von drei Photovoltaik-Freiflächenanlagen (PV-FFA) im Raum Freiberg - Effekte der Module und der Nutzung. Bachelorarbeit Studiengang Geoökologie, TU Bergakademie Freiberg, AG Biologie/Ökologie, Institut für Bio-wissenschaften (unpubl.).

## Kontakt zur Autorenschaft:

**Zappek, Noah:** E-Mail: noza@tutamail.com

**Achtziger, Roland; Glaser, Karin; Richert, Elke:** TU Bergakademie Freiberg, Institut für Biowissenschaften, AG Biologie / Ökologie, Lessingstr. 45, 09599 Freiberg, E-Mail: [roland.achtziger@tu-freiberg.de](mailto:roland.achtziger@tu-freiberg.de), [karin.glaser@ioez.tu-freiberg.de](mailto:karin.glaser@ioez.tu-freiberg.de), [elke.richert@tu-freiberg.de](mailto:elke.richert@tu-freiberg.de).

## Anhang

**Tabelle A1:** Vegetationstabelle der Pflanzengesellschaften der drei untersuchten Photovoltaikanlagen.

**Table A1:** Vegetation table of the plant communities of all photovoltaic parks.

Spalten 1-10: *Poa pratensis*-*Alopecurus pratensis*-Gesellschaft, Ausprägung mit *Agrostis stolonifera*

Spalten 11-16: *Poa pratensis*-*Alopecurus pratensis*-Gesellschaft, Ausprägung mit *Anthoxanthum odoratum* und *Cynosurus cristatus*

Spalten 17-21: *Poa pratensis*-*Alopecurus pratensis*-Gesellschaft, Ausprägung mit *Juncus effusus*

Spalten 22-27: *Poa pratensis*-*Alopecurus pratensis*-Gesellschaft, Ausprägung mit *Urtica dioica*

Spalten 28-36: *Trifolium pratense*-*Achillea millefolium*-Gesellschaft, Ausprägung mit *Festuca ovina* agg.

Spalten 37-48: *Trifolium pratense*-*Achillea millefolium*-Gesellschaft, typische Ausprägung

Flächentyp / plot type: M – unter dem Modul, H – an der Oberkante des Moduls, S – zwischen den Modulen / M – under modules, H – at the upper edge of the modules, S – between modules; Anlagen / solar parks: TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune 2; DS – Davidschacht; Dges [%] = Deckung gesamt / total coverage, DKr [%] = Deckung Krautschicht / coverage herb layer, DMoos [%] = Deckung Moosschicht / coverage moss layer, DStreu [%] = Deckung Streuschicht / coverage litter layer, HKr [cm] = Höhe Krautschicht / height herb layer; Stetigkeit (absolut) / frequency (absolute).

Spalten-Nummer	1	111111	11122	222222	2233333333	333444444444
Aufnahmenummer	1234567890	123456	78901	234567	890123456	789012345678
				Z Z Z	AA A A	A A
	TTTT	TTT	TZTTTT	ZZZZZ	BZBZBZ	LLALBLAAA
	T3311	TT333	1B3333	AAAAAA	1B1A1B	11R1L1RLR
	1///	11///	/7///	11111	070107	226266464
	/3322//	226	2-2663	-----	-----	-----
	7778877889	828997	25255	424242	443433232	338338832333
Flächentyp	HMHMHMHMHM	SSSSHS	SSHMH	SHHMM	HSSMSSSH	HHHHHSMMMMMM
Anlage	TTTTTTTTT	TZTTTT	ZZZZZ	ZZZZZZ	DDDDDDDDDD	DDDDDDDDDDDDDD
	HHHHHHHHHH	HSHHHH	SSSSS	SSSSSS	SSSSSSSSSS	SSSSSSSSSSSSSS
Dges [%]				1		
	7989779986	890999	97989	999999	946949659	789996688766
	5050505500	500055	05000	055555	050000505	055000055000
DKr [%]						
	7686769575	699999	97878	999999	645839646	263666468466
	5050055555	000055	05555	055355	500000500	000000500000
DMoos [%]	225	51	4 4	1	1 1	1 82131 239
	500056	005	0 0	0 1	550	0 000005500 555000550000
DStreu [%]						
	6231	16 2	241 6	4522	3 1 72	18326167 321117215615
	055055050	505 30	00555	550605	000700505	005000500000
HKr [cm]						
	6752237242	283449	66566	867766	111212122	2112 1122
	5052385005	050000	05555	550000	384008550	397575396370

Spalten-Nummer	1	111111	11122	222222	2233333333	333444444444
	1234567890	123456	78901	234567	890123456	789012345678
Anlage	TTTTTTTT	TZTTTT	ZZZZZ	ZZZZZZ	DDDDDDDD	DDDDDDDDDDDD
Flächentyp	HHHHHHHHHH	HSHHHH	SSSSS	SSSSSS	SSSSSSSS	SSSSSSSSSSSS
Artname	HHHMMSHMM	SSSSHS	SSHMH	SHHMM	HSSMSSSH	HHHHHSMMMMMM
	Ste					
<i>Poa pratensis-Alopecurus pratensis-Gesellschaft, Agrostis stolonifera-Ausprägung</i>						
Agrostis stolonifera^K	11	+113b1133a			a...	
<i>Poa pratensis-Alopecurus pratensis-Gesellschaft, Anthoxanthum odoratum-Cynosurus cristatus-Ausprägung</i>						
Anthoxanthum odoratum^K	6	.....	+a	11a.b		
Cynosurus cristatus^K	5	.....	a1	1+..a		
Lolium multiflorum^K	3	.....	1	...aa		
Lathyrus pratensis^K	3	.....	+..1	...r		
<i>Poa pratensis-Alopecurus pratensis-Gesellschaft, Juncus effusus-Ausprägung</i>						
Juncus effusus^K	5	.....		3b4bb		
Equisetum arvense^K	4	.....		1++..+		
Lychnis flos-cuculi^K	1	.....		r...		
Achillea ptarmica^K	1	.....		..+		
Deschampsia flexuosa^K	1	.....		..a		
Galium saxatile^K	1	.....		..+		
<i>Poa pratensis-Alopecurus pratensis-Gesellschaft, Urtica dioica-Ausprägung</i>						
Urtica dioica^K	7	.....	..r	+bb334		
Festuca gigantea^K	5	.....		+a3.bb		
<i>Poa pratensis-Alopecurus pratensis-Gesellschaft</i>						
Poa pratensis^K	24	aab1aaaaaa	.1.aal	a1b3a	.b33ba	
Alopecurus pratensis^K	21	343bbb4bbb	aa3b14	+1b.1		+
Ranunculus acris^K	14	++..1+.r1+	1..r+	+++.1		
Vicia tetrasperma^K	9	.....++..	.+....	aa1..	11..1	
Bromus hordeaceus agg.^K	6	.....	.1..r	r....	a+.r	
Trisetum flavescens^K	5	..1.....1	....4	..+.r		
Deschampsia cespitosa^K	3	...1.1....			..+	
Festuca pratensis^K	2	.....1		..+..a+		

Spalten-Nummer	1	111111	11122	222222	223333333	333444444444
	1234567890	123456	78901	234567	890123456	789012345678
Anlage	TTTTTTTT	TZTTTT	ZZZZZ	ZZZZZZ	DDDDDDDD	DDDDDDDDDDDD
Flächentyp	HHHHHHHHHH	HSHHHH	SSSSS	SSSSSS	SSSSSSSS	SSSSSSSSSSSS
	HHMHMMSHMM	SSSSHS	SSHMH	SHHMM	HSSMSSSH	HHHHHSMMMMMM
<b><i>Trifolium pratense-Achillea millefolium</i>-Gesellschaft, <i>Festuca ovina</i> agg.-Ausprägung</b>						
Festuca ovina agg.^K	11 .....	.....	1....	+.....	aaaal1aa+	.....
<b><i>Trifolium pratense-Achillea millefolium</i>-Gesellschaft</b>						
Achillea millefolium^K	19 .....	.....	.....	.....	r++++1..+	++++++111
Trifolium pratense^K	15 .....	.....	.....	.....	a...a...11	1aaaa.+1aab1
Hypochaeris radicata^K	15 .....	.....	.....	.....	.rarr.rra	.rar..11+r.1
Pilosella officinarum^K	13 .....	.....	.....	.....	.+.+.+a1	r1a+.ra..1.a
Daucus carota^K	12 .....	.....	.....	.....	r.r1....	+++.+11+.11
Lotus corniculatus^K	11 .....	.....	.....	.....	.+.+b11.	....a1111.1
Trifolium campestre^K	5 .....	.....	.....	.....	.1....a+a	.....1..1
Tussilago farfara^K	5 .....	.....	.....	.....	....+	....++1..
Crepis capillaris^K	5 .....	.....	.....	.....	....+	....++
Medicago lupulina^K	3 .....	.....	.....	.....	....+	....1...1
Cirsium acaule^K	2 .....	.....	.....	.....	....r....+	
<b>Störzeiger/Ackerbegleitarten</b>						
Cardamine hirsuta^K	4 .....	.....	.....	.....	[r.....	....+r....
Draba verna^K	4 .....	.....	.....	.....	+...-++-	-...-+...-
<b>Zeiger für Verbrachung/Gehölzarten</b>						
Prunus spec.^K	4 .....	.....	.....	.....	1.....	+.r+..
Tanacetum vulgare^K	3 .....	.....	.....	.....	r...+	....1..
Solidago canadensis^K	3 .....	.....	.....	.....	....	+r..r
Clematis vitalba^K	2 .....	.....	.....	.....	1.....	r.r
Betula pendula^K	2 .....	r.....	.....	.....	1.....	....
Salix caprea^K	1 .....	.....	a....	.....	....	....
Quercus petraea^K	1 .....	.....	.....	.....	....	....+
<b>Grünlandarten älterer Anlagen</b>					....	....
Cerastium holosteoides^K	19 .....	rr.	.....	.....	[.....	++1.+b++.
Trifolium dubium^K	11 .....	..+	.....	.....	.....	...++r+.+1r
Vicia hirsuta^K	18 .....	1....	1++..	1++..	.....	++1..1+a...
Vicia sativa^K	15 .....	1....	1+r.	1.1++	++1.a...	....+r...+
Lolium perenne^K	9 .....	b.....	1a.....	.....	.....	..+r+1....+
Galium album^K	2 .....	.....	1+...	.....	1.....	....+.....1..
Arrhenatherum elatius^K	4 .....	.....	1....	1a....	1....	....+.....1..

Spalten-Nummer	1	111111	11122	222222	223333333	333444444444
	1234567890	123456	78901	234567	890123456	789012345678
Anlage	TTTTTTTT	TZTTTT	ZZZZZ	ZZZZZZ	DDDDDDDDDD	DDDDDDDDDDDDDD
Flächentyp	HHHHHHHHHH	HSHHHH	SSSSS	SSSSSS	SSSSSSSSSS	SSSSSSSSSSSS
<b>sonstige Arten des genutzten Grünlandes</b>	HHMHMMSHMM	SSSSHS	SSHMH	SHHMM	HSSMSSSH	HHHHHSMMMMMM
Festuca rubra^K	37	111a+1aa11	a1b1a1	.1.a1	13.b.3	aa..a..3+a
Holcus lanatus^K	36	b11b111a1.	+4a.1a	1+a1b	4ba+aa	1..a....1
Dactylis glomerata^K	17	1+.+++.+.1	...1..	..a1.	a..1+1	1.....
Taraxacum officinale agg.^K	34	.....1	.1.1r.	1a1+1	1++++.	1++++.+1+
Rumex acetosa^K	20	11++r.++.	+.+.11	..+r	.....	..... r.r.r.r...rr
Agrostis capillaris^K	22	.....	3+3aa.	.....	..aa1+ba1+	+.1+.aa.+11a
Trifolium repens^K	12	.....+..	.11..	.....	1+3b.a...	.1.a.....a+
Plantago lanceolata^K	18	.....ar..	.1...	11...	.....aaa.+	11r.r+r.1+..+

#### Außerdem kamen vor:

Epilobium parviflorum^K T1/28M:r, ZA1-2H:1, ZA1-5M:1, ZA1-5H:+, ZA1-2M:1; Poa angustifolia^K T3/37H:1, T3/69S:1, T3/69H:1, ZB10-4H:a; Geum urbanum^K ZB7-2S:r, ZA1-5M:1, ZB10-4M:1, ZB7-2M:1; Phleum pratense^K ZB7-2S:1, ZA1-2H:a, ZA1-2M:1; Vicia cracca^K T3/37H:+, T3/37M:1, ZB7-2H:+, ZB10-4M:; Crepis biennis^K ZB10-4S:r, BL6-3H:+; Glechoma hederacea^K T3/28H:r, T3/28M:+; Rumex acetosella^K AR6-3M:r; Veronica persica^K AR6-3S:+; Galium aparine^K T3/37H:r; Veronica serpyllifolia^K T3/37S:1; Galeopsis tetrahit^K T3/69M:r; Geranium dissectum^K ZB7-2S:r; Vicia sepium^K ZA1-2M:1; Geranium molle^K ZB7-2H:+; Chenopodium polyspermum^K T1/28M:r; Polygonum aviculare^K T3/69M:r; Prunella vulgaris^K T3/69S:+; Bellis perennis^K AR4-2H:a; Hieracium sabaudum^K AR6-3M:1; Arabidopsis thaliana^K AR4-8S:+; Ranunculus repens^K AL6-3H:a; Veronica arvensis^K AL6-3S:+; Campanula patula^K AL6-3S:r; Silene vulgaris^K BL6-3M:r; Veronica spec.^K AL12-4S:r; Cardamine pratensis^K AL16-3M:+.

**Tabelle A2:** Nachgewiesene Pflanzenarten auf den drei PV-Anlagen: DS – Davidschacht; TH – Bürgersolarpark Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune 2. Grau – Art wurde nachgewiesen.

**Table A2:** Plant species recorded in the three photovoltaic parks: TH – Tannenhübel; ZS – Ziegelscheune 2; DS – Davidschacht. Grey – species has been detected.

Artnname	TH	ZS	DS
<i>Chenopodium polyspermum</i>			
<i>Galeopsis tetrahit</i>			
<i>Galium aparine</i>			
<i>Glechoma hederacea</i>			
<i>Polygonum aviculare</i>			
<i>Prunella vulgaris</i>			
<i>Veronica serpyllifolia</i>			
<i>Betula pendula</i>			
<i>Trifolium repens</i>			
<i>Agrostis stolonifera</i>			
<i>Anthoxanthum odoratum</i>			
<i>Bromus hordeaceus</i> agg.			
<i>Cynosurus cristatus</i>			
<i>Deschampsia cespitosa</i>			
<i>Epilobium parviflorum</i>			
<i>Festuca pratensis</i>			
<i>Lathyrus pratensis</i>			
<i>Lolium multiflorum</i>			
<i>Poa angustifolia</i>			
<i>Poa pratensis</i>			
<i>Ranunculus acris</i>			
<i>Trisetum flavescens</i>			
<i>Vicia cracca</i>			
<i>Vicia tetrasperma</i>			
<i>Agrostis capillaris</i>			
<i>Alopecurus pratensis</i>			
<i>Cerastium holosteoides</i>			
<i>Dactylis glomerata</i>			
<i>Festuca rubra</i>			
<i>Holcus lanatus</i>			
<i>Lolium perenne</i>			
<i>Plantago lanceolata</i>			
<i>Rumex acetosa</i>			
<i>Taraxacum officinale</i> agg.			
<i>Achillea millefolium</i>			
<i>Arabidopsis thaliana</i>			
<i>Bellis perennis</i>			
<i>Campanula patula</i>			
<i>Cardamine hirsuta</i>			
<i>Cardamine pratensis</i>			
<i>Cirsium acaule</i>			
<i>Clematis vitalba</i>			
<i>Crepis capillaris</i>			
<i>Daucus carota</i>			
<i>Draba verna</i>			
<i>Hieracium sabaudum</i>			
<i>Hypochaeris radicata</i>			
<i>Lotus corniculatus</i>			
<i>Medicago lupulina</i>			
<i>Pilosella officinarum</i>			
<i>Prunus</i> spec.			
<i>Quercus petraea</i>			
<i>Ranunculus repens</i>			
<i>Rumex acetosella</i>			
<i>Silene vulgaris</i>			
<i>Solidago canadensis</i>			
<i>Tanacetum vulgare</i>			
<i>Trifolium campestre</i>			
<i>Trifolium pratense</i>			
<i>Tussilago farfara</i>			
<i>Veronica arvensis</i>			
<i>Veronica persica</i>			
<i>Veronica</i> spec.			
<i>Achillea ptarmica</i>			
<i>Deschampsia flexuosa</i>			
<i>Equisetum arvense</i>			
<i>Festuca gigantea</i>			
<i>Galium saxatile</i>			
<i>Geranium dissectum</i>			
<i>Geranium molle</i>			
<i>Geum urbanum</i>			
<i>Juncus effusus</i>			
<i>Lychnis flos-cuculi</i>			
<i>Phleum pratense</i>			
<i>Salix caprea</i>			
<i>Urtica dioica</i>			
<i>Vicia sepium</i>			
<i>Arrhenatherum elatius</i>			
<i>Crepis biennis</i>			
<i>Festuca ovina</i> agg.			
<i>Galium album</i>			
<i>Trifolium dubium</i>			
<i>Vicia hirsuta</i>			
<i>Vicia sativa</i>			