



SolarInput e.V. • Gustav-Tauschek-Straße 2 • D-99099 Erfurt

Thüringer Aufbaubank

Frau Jasmin Koch
Gorkistraße 9
99084 Erfurt

SolarInput e.V.
Geschäftsstelle
Gustav-Tauschek-Straße 2
D-99099 Erfurt

Tel.: +49-(0) 15736700967
Fax: +49 (0) 361 – 600 85 109

j.happ@solarinput.de
www.solarinput.de

30.01.2025

Förderung der Zusammenarbeit in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft
(Teilmaßnahme A) – Tätigkeit von Operationellen Gruppen (OG) der
Europäischen Innovationspartnerschaft (EIP) „Landwirtschaftliche Produktivität
und Nachhaltigkeit“

Abschlussbericht zum Vorhaben: Agri-PVThue

Ihr Zeichen

Unser Zeichen
SI

Datum
16. Oktober 2024



Förderzeitraum: 01.08.2023 – 31.10.2024

Verfasser:in: Janina Happ, Leon Hoffmann, Hubert Aulich

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	3
2. Projektbeschreibung	6
3. Ergebnisse.....	9
4. Auswertung und Diskussion	10
5. Fazit	11
6. Literaturverzeichnis	12
7. Anhang.....	13

1. Einleitung

Das Projekt Agri-PVThue untersucht die Integration von Photovoltaik (PV) in bestehende landwirtschaftliche Flächen, ein Konzept, das als Agri-Photovoltaik (Agri-PV/ APV) bezeichnet wird. Im Rahmen dieses Ansatzes werden Solarmodule auf landwirtschaftlichen Flächen installiert, ohne dass diese für die Nahrungsmittelproduktion verloren gehen. Stattdessen wird der Boden entweder unter und/oder zwischen den Modulen weiterhin bewirtschaftet.

Agri-PV bietet eine vielversprechende Möglichkeit, die Energiewende voranzutreiben, ohne Konflikte mit der Nahrungsmittelproduktion zu verursachen. Durch die gleichzeitige Nutzung von Flächen für Energieerzeugung und Landwirtschaft können folgende Vorteile realisiert werden:

- **Produktion von erneuerbarer, sauberer Energie und landwirtschaftlichen Kulturpflanzen:** Agri-PV ermöglicht die Energieproduktion aus Sonnenlicht, und damit Unabhängigkeit von Importen, und Emissionsfreiheit, einerseits, und die Nutzung des Sonnenlichts zum Anbau von Pflanzen, oder auch zur Tierhaltung, andererseits.
- **Erhalt von Kulturlandschaft und Nahrungsmittelsicherheit:** Agri-PV trägt zur Erhaltung von Kulturlandschaften bei und gewährleistet gleichzeitig eine stabile Nahrungsmittelproduktion.
- **Förderung der Biodiversität:** Durch gezielte Gestaltung von Agri-PV-Anlagen, wie z.B. die Schaffung von Blühstreifen und Lebensräumen für Tiere, kann die Biodiversität gefördert werden.
- **Synergieeffekte:** Die Kombination von Landwirtschaft und Photovoltaik kann zu positiven Synergieeffekten führen, wie z.B. verbesserten Bodenbedingungen, verringerten Schäden durch Wetterextreme, und einem reduzierten Wasserbedarf.
- **Wirtschaftliche Vorteile für Landwirte:** Agri-PV bietet Landwirten die Möglichkeit, zusätzliche Einnahmen durch den Verkauf von Strom zu generieren und die Betriebskosten zu senken.
- **Stärkung der regionalen Wertschöpfung:** Durch die Förderung regionaler Energiegemeinschaften kann die Energieunabhängigkeit gestärkt und die lokale Wertschöpfung erhöht werden.

Ziel dieses Projekts ist es, das Potenzial von Agri-PV für die Region Thüringen zu evaluieren und konkrete Umsetzungsmöglichkeiten zu entwickeln. Im Rahmen des Agri-PVThue Konzeptes werden folgende Aspekte näher untersucht:

- **Fruchtfolge:** Analyse verschiedener Thüringer Ackerkulturen hinsichtlich ihrer Eignung unter Agri-PV (u. a. Schattentoleranz)
- **Technologische Machbarkeit:** Analyse verschiedener Agri-PV-Konzepte und ihrer Eignung für die regionalen Bedingungen.
- **Ökonomische Rentabilität:** Bewertung der wirtschaftlichen Aspekte von Agri-PV-Anlagen für Landwirt:innen und Investor:innen.

- **Ökologische Auswirkungen:** Untersuchung der Auswirkungen von Agri-PV auf die Biodiversität, den Boden und das Mikroklima.
- **Soziale Akzeptanz:** Analyse der Akzeptanz von Agri-PV bei Landwirt:innen, Bürger:innen und politischen Entscheidungsträger:innen.

Internationale und einige nationale Studien zeigen bereits, dass Agri-PV eine vielversprechende Strategie zur nachhaltigen Intensivierung der Landwirtschaft und zur Energiewende darstellt. Durch die Kombination von Solarmodulen und landwirtschaftlicher Nutzung können Erträge gesteigert, der Wasserverbrauch reduziert und die Bodenqualität verbessert werden. Darüber hinaus bietet Agri-PV die Möglichkeit, regionale Wertschöpfungsketten zu stärken und neue Einkommensmöglichkeiten für Landwirt:innen zu schaffen. (Vollmer, 2022; Wydra et al., 2022) Bereits die Ergebnisse der Studie *Potenzial der Agri-PV in Thüringen* (Wydra et al., 2022) unterstreichen das Potenzial von Agri-PV-Anlagen zur Stärkung der regionalen Wertschöpfung in Thüringen und zur Reduzierung der Abhängigkeit von Energieimporten. Erste Projekte zeigen außerdem, dass Agri-PV-Anlagen einen positiven Beitrag zur Biodiversität und zur Anpassung an den Klimawandel leisten können (Ludzuweit et al., 2024; *Agrisolar Handbook*, 2024). Wirtschaftlich gesehen können die zusätzlichen Einnahmen aus der Stromerzeugung die Rentabilität landwirtschaftlicher Betriebe erhöhen und zur Sicherung der Existenzgrundlage beitragen (Vollmer, 2022; Wydra et al., 2022).

Hintergrund des Projekts Agri-PVThue ist die dringende Notwendigkeit, zur Minderung des Klimawandels beizutragen und sich in der Landwirtschaft in Mittelthüringen an den Klimawandel anzupassen. Thüringen ist bereits jetzt stark von den Folgen des Klimawandels betroffen: Häufige Starkregenereignisse, langanhaltende Trockenperioden, Ernteausfälle und unregelmäßige Wetterextreme sowie Spätfröste belasten die Landwirtschaft und die Naturräume (TLUBN, 2020). Agri-PV bietet hier eine vielversprechende Lösung, um die Resilienz der Region zu stärken, die landwirtschaftliche Produktion zu sichern und gleichzeitig einen Beitrag zur Energiewende zu leisten.

Der Verein SolarInput e.V. hat es sich zur Aufgabe gemacht, innovative Lösungen für die Herausforderungen der Landwirtschaft zu stärken. Das F & E Projekt Agri-PVThue, welches mit einem Konsortium aus Expert:innen aus den Bereichen Landwirtschaft, Energie und Wissenschaft umgesetzt wurde, konzentriert sich insbesondere auf den Ackerbau mit typischen Thüringer Ackerkulturen. Die Zusammenarbeit mit lokalen Akteur:innen, wie dem Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und ländlichen Raum (TLLLR), dem Thüringer Bauernverband, der Fachhochschule Erfurt etc., und Expert:innen der Solarbranche, wie der Enerparc AG und vielen weiteren, war und ist für den weiteren Erfolg des Vorhabens von entscheidender Bedeutung. Durch die Planung einer Demonstrationsanlage schaffen wir einen Raum für den Austausch von Wissen und Erfahrungen. Gemeinsam entwickeln wir innovative Lösungen für die Herausforderungen der Landwirtschaft im Kontext des Klimawandels. Agri-PV hat das Potenzial, nicht nur die Landwirtschaft zu transformieren, sondern auch neue Arbeitsplätze zu schaffen. Bereits im Obstbau konnte gezeigt werden, dass die Kombination von Solarmodulen und Pflanzenanbau ein großes Potenzial zur Steigerung der Resilienz und der Nachhaltigkeit bietet (Trommsdorff et al., 2023; Widmer et al., 2024).

Durch unsere Arbeit wollen wir diese Erfolge auch auf die Ackerwirtschaft übertragen, unter Berücksichtigung der gängigen, ackerwirtschaftlichen Praxis.

Aktuelle Veröffentlichungen, wie beispielsweise das *Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende – Ein Leitfaden für Deutschland* (Trommsdorff et al., 2024) und das *Agrisolar Handbook* aus dem Jahr 2024, untermauern das Potenzial von Agri-PV-Systemen. Die Ergebnisse zeigen, dass unter geeigneten Bedingungen signifikante Verbesserungen in der Landwirtschaft erzielt werden können. So berichten verschiedene Studien von Ertragssteigerungen bis zu 60 % und eine Erhöhung der Wasserspeicherkapazität des Bodens um 20-30 % (Abb. 1). Darüber hinaus kann Agri-PV dazu beitragen, extreme Bodentemperaturen auszugleichen. Die vielversprechenden Ergebnisse eröffnen neue Perspektiven für die Landwirtschaft. Wir möchten diese Erkenntnisse nun nutzen, um die Technologie für den Einsatz im Ackerbau zu skalieren.

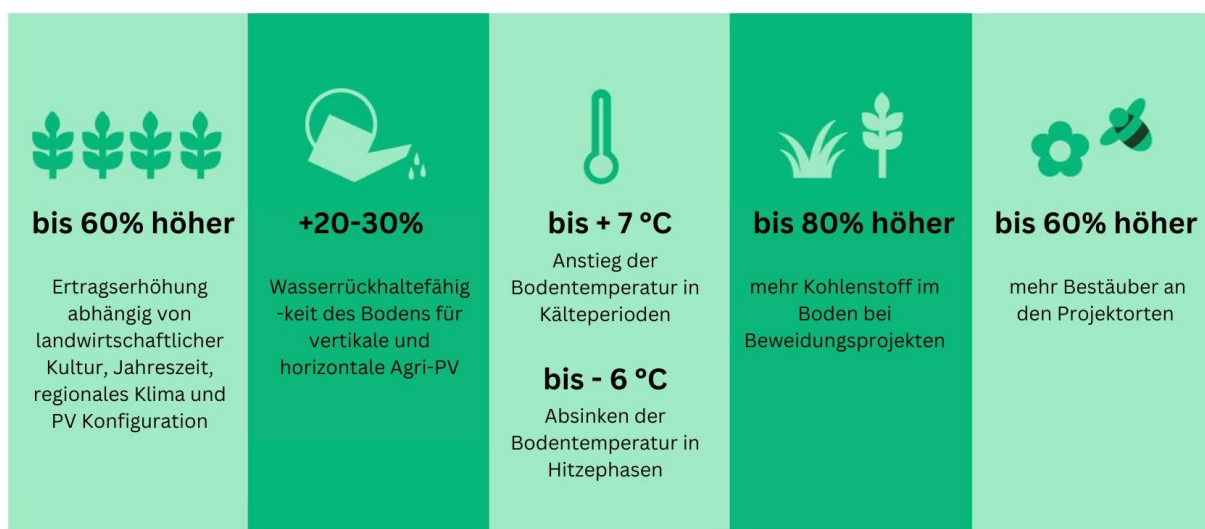


Abbildung 1 Vorteile von Agri-PV Projekten modifiziert nach SOLARPOWER EUROPE 2024

Während in Deutschland bereits zahlreiche kommerzielle Projekte zur Kombination von Tierhaltung und Photovoltaik existieren, konzentrieren sich Projekte im Pflanzenbau bislang oft auf kleinere Demonstrationsanlagen. Insbesondere großflächige Ackerflächen, wie sie in Thüringen typisch sind, werden seltener für Agri-PV-Anlagen genutzt. Mit dem Projekt *Agri-PVThue* wollen wir nachweisen, dass auch extensive Agrarflächen, wie in Thüringen üblich, für die großflächige Umsetzung von Agri-PV-Anlagen geeignet sind. Ziel ist es, eine erfolgreiche Zusammenarbeit zwischen Landwirtschaft, Energieunternehmen und Kommunen zu etablieren und so einen Beitrag zur Energiewende in Thüringen zu leisten.

Als Orientierung für die Planung und den Betrieb von Agri-PV-Anlagen dient die DIN SPEC 91434. Diese technische Spezifikation legt detaillierte Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung fest und stellt sicher, dass die ökologischen und wirtschaftlichen Potenziale von Agri-PV optimal genutzt werden.

Die meisten Synergien für die Landwirtschaft im Rahmen der Agri-PV ergeben sich durch hochaufgeständerte APV-Anlagen. Durch die erhöhte Montage der Solarmodule über den Anbauflächen entsteht ein optimaler Raum für die Doppelnutzung von Landwirtschaft und Energiewirtschaft. Zu den Vorteilen zählen die effiziente Nutzung der Fläche, Schutz der

Pflanze bei Extremwetterereignissen, höhere Energieerträge durch verminderte Verschattung der Module und ein potenziell verbessertes Mikroklima unter den Modulen, das das Pflanzenwachstum fördern kann (Kapitel 4, Anhang III). Dies und viele weitere Ergebnisse werden näher im angehängten Konzept zur Implementierung von Agri-PV in Thüringen erklärt (Anhang III).

Das *Agri-PVThue* Projekt hat erfolgreich die Förderziele der Thüringer Aufbaubank erfüllt, indem es eine enge Kooperation zwischen Akteuren aus Land- und Ernährungswirtschaft, Industrie und Wissenschaft ermöglichte. Durch diesen Zusammenschluss konnten wir die Innovationskraft und Wettbewerbsfähigkeit landwirtschaftlicher Betriebe durch einen intensiven Wissens- und Technologietransfer nachhaltig stärken.

2. Projektbeschreibung

Das Projekt umfasste acht parallel ausgeführte Arbeitspakete. Ziel war es, umfassende Informationen für eine praxisnahe Konzeption einer Agri-PV-Anlage in Thüringen zu sammeln, wissenschaftliche Forschungsmaßnahmen zu planen und die Verbreitung von Wissen über Agri-PV zu fördern. Hierzu wurden gezielt Kommunen, Landwirt:innen, Umweltschützer:innen und regionale Politiker:innen angesprochen.

Im Folgenden werden alle beteiligten Projektpartner:innen genannt:

Tabelle 1: Projektpartner:innen im Projekt Agri-PVThue

Projektpartner	Abkürzung
SolarInput e.V.	SolarInput
Fachhochschule Erfurt	FH Erfurt
Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum	TLLLR
PHARMAPLANT Arznei- und Gewürzpflanzen Forschungs- und Saatzucht GmbH	Pharmaplant
Thüringer Bauernverband e.V.	TBV
Agrargenossenschaft Weißensee	AG Weißensee
Enerparc AG	Enerparc
TEAG Solar GmbH	TEAG Solar
AHP GmbH & Co. KG	AHP
Landschaftspflegeverband Mittelthüringen e.V.	LPV Mittelthüringen
Thüringer Energie und GreenTech Agentur	ThEGA

Alle Projektpartner:innen haben sich an einem oder mehreren Arbeitspaketen beteiligt und ihre Expertise, Zeit und Ressourcen zur Verfügung gestellt. Die erfolgreich ausgeführten Projektaktivitäten werden in der folgenden Tabelle aufgeführt:

Tabelle 2: Überblick über die einzelnen Arbeitspakete des Projekts, die darin enthaltenen ausgeführten Aktivitäten sowie die beteiligten Projektpartner.

Arbeitspakete	Ausgeführte Projektaktivitäten	Partner
1. Projektmanagement	Projektmanagement & Organisation: ▪ Projektmeetings ○ Kick-Off Meeting (Oktober 2023) ○ Auftakt Meeting (Februar 2024) ○ Konsortiumstreffen (Mai 2024) ○ Abschlusstreffen (Dezember 2024) ▪ Koordination zur Repräsentanz von Agri-PV bei Veranstaltungen (Aktionstag Nachhaltigkeit 2024, RENN.mitte Jahrestagung 2024, Nachhaltigkeitsforum 2024) ▪ Organisation von Agri-PV Online Workshop (Mai 2024) ▪ Betreuung von Website & Newsletter Konzeption & Planung: ▪ Konkretisierung der Projektfläche ▪ Vernetzung der Projektpartner:innen ▪ Projektcontrolling, Steuerung und Zeitarbeitsplan ▪ Zusammentragen der fachlichen Projektinformationen ▪ Konzepterstellung (Gesamtprojekt & Thüringen-spezifisch) ▪ Design von Öffentlichkeitsarbeit-Materialien Umsetzung & Weiterentwicklung: ▪ Besichtigungen von Agri-PV-Anlagen (Gelsdorf, Rathenow) ▪ Einarbeitung in Genehmigungs- und Zertifizierungsprozesse	SolarInput
2. Analyse Pflanzenkulturen, Fruchtfolge unter Solarmodulen	Literaturrecherche und -auswertung: ▪ Auswertung und Kategorisierung der Literatur zu Ackerkulturen unter Agri-PV Pflanzenauswahl und -optimierung: ▪ Optimierung von Pflanzenkulturen und PV-Systemen ▪ Auswahl konventioneller Ackerkulturen (TLLLR, FHE) ○ Bewertung von Schattentoleranz, Wasserhaushalt, Wetterschutz und Ertrag ▪ Berücksichtigung von Sonderkulturen (Pharmaplanten, FHE/FGK)	FH Erfurt TLLLR Pharmaplan TBV AG Weißensee
3. Analyse Agri-PV-Anlagentechnik	Systemgestaltung und Optimierung: ▪ Bewertung von Systemkomponenten ▪ Bewertung zur Entwicklung von Arbeitsbreiten unter Berücksichtigung der Größe landwirtschaftlicher Maschinen	SolarInput Enerparc AG Teag Solar

	▪ Festlegung des Anlagendesigns ▪ Optimierung für maximale Synergien ▪ Festlegung der Energieerträge Netzanschluss und -integration: ▪ Vorarbeiten zur Netzverträglichkeitsprüfung, zu Einspeisekonzept und Netzeinspeisung	
4. Wirtschaftlichkeitsanalyse APV-Pilotanlage	Wirtschaftlichkeitsanalyse: ▪ Bewertung landwirtschaftlicher und energetischer Erträge ▪ Bewertung der Wertschöpfungspotenziale ▪ Evaluierung von Investitionsbedarf und Betriebskosten ▪ Evaluierung von Verwertungspotenzial und Energienutzung Demonstration und Pilotprojekt: ▪ Mehrwert einer Demonstrationsanlage mit angepassten Durchfahrtsbreiten ▪ Erste Schritte in der Kommunikation mit einem möglichen Investor Energiespeicherung: ▪ Evaluierung von Speichermöglichkeiten ▪ Entscheidung gegen Speicherung aufgrund von Netzbedingungen	SolarInput Enerparc AG AHP TBV
5. Konzept für eine APV-Pilotanlage mit flankierenden F&E-Maßnahmen in Thüringen	Planung und Vorbereitung: ▪ Standortprüfung ▪ Umweltverträglichkeitsprüfung ▪ Finanzierungskonzept ▪ Wassermanagementkonzept Konzeption und Umsetzung: ▪ Versuchsplan und Monitoring ▪ Naturschutzkonzept (Biodiversität, Feldhamster) ▪ Wissenschaftliches Monitoringkonzept unter Betrachtung verschiedener Fördermöglichkeiten Wissenschaftliche Grundlagen: ▪ Gutachten zu Wassermanagement, Boden, Epigenetik, Sonderkulturen, Fruchtfolge	SolarInput Enerparc AG TLLLR Pharmaplant FH Erfurt TBV LPV Mittelthüringen
6. Geschäftsmodellentwicklung	Beteiligung: ▪ Landwirtschaftlicher Betrieb: Flächenbereitstellung und Bewirtschaftung ▪ PV-Investor/ Betreiber: PV-System-Bereitstellung und PV-System Betrieb, Pächter:innen der Agrarfläche (Energieunternehmen) Genehmigungskonzept: ▪ Untersuchung zur Zertifizierung	SolarInput Enerparc AG TBV
7. Akzeptanz und Partizipation	Politische Ebene: ▪ Anhörungsverfahren Thüringer Landtag	SolarInput Enerparc AG

	▪ Gemeinderatssitzung in Rohrbach (April 2024) ▪ Projektvorstellung vor Thüringer Bürgermeister:innen (November 2023) ▪ Repräsentanz von Agri-PV durch den TBV bei der Thüringer Agrarministerkonferenz (März 2024) Wissenschaftliche Ebene: ▪ Wissenstransfer Agri-PV durch FH Erfurt Praktische Umsetzung: ▪ Nachhaltigkeitsforum Oktober 2024 ▪ Gewinnbeteiligung der Gemeinde geplant	ThEGA
8. Kommunikation	Nutzung verschiedener Kanäle zur Verteilung von Informationen zum Thema Agri-PV: Digitale Kanäle: ▪ SolarInput Website ▪ LinkedIn-Auftritt ▪ Newsletter ▪ Online-Workshop Agri-PV (Link zum Video) ○ Ausführliche schriftliche Beantwortung der Publikumsfragen, sowie Bereitsstellung per E-Mail und auf der SolarInput Website (Link) ○ Power Point Folien (Link) Veranstaltungen: ▪ Aktionstag Nachhaltigkeit (Juni 2024) ▪ Thüringer Nachhaltigkeitsforum (Oktober 2024) Printmedien: ▪ Poster, Flyer, Handouts, Roll Up (Angang I) ▪ Veröffentlichung des Bauernverbandes zum Agri-PVThue Projektstart	SolarInput Enerparc AG TBV LPV Mittelthüringen ThEGA

Während der Projektlaufzeit haben zahlreiche Konsultationen mit den Partnerorganisationen stattgefunden (beispielsweise dem Landschaftspflegeverband Mittelthüringen e.V.). Während wiederholter Projekttreffen in unterschiedlichen Konstellationen wurde zu Themen wie naturschutzfachliche Mindestkriterien, Feldhamsterschutz, Monitoring und Messkonzept, Fruchtfolge, Anlagen-Design, landwirtschaftliche Maschinen und Arbeitsbreiten, Flächenverfügbarkeit und Flächenkriterien beraten. Die erzielten Ergebnisse sind detailliert im angehängten Konzept beschrieben (Anhang III).

Wichtige Fokusthemen wurden extensiv innerhalb des Projektes bearbeitet, wie beispielsweise Verschattung, Pflanzenauswahl und Erträge. Die unzuverlässige Datengrundlage aus Verschattungsanalysen machten jedoch die Notwendigkeit regionaler Ergebnisse unter Thüringer Bedingungen deutlich.

3. Ergebnisse

Die Arbeitspakete 1 – Projektmanagement, 7 - Akzeptanz und Partizipation und 8 – Kommunikation bildeten das Rückgrat des Projekts. Durch die umfassende Koordination aller

Aktivitäten konnten wir sicherstellen, dass alle Projektbestandteile reibungslos ineinandergriffen.

Zur Koordination und Umsetzung des Projektes gehörten unter anderem die Organisation von Netzwerktreffen, die Entwicklung von Kommunikationsmaterialien und die Veranstaltungsorganisation. Durch die gezielte Nutzung von Online-Kanälen, Fachpublikationen und Veranstaltungen konnte die Information über Agri-PV erfolgreich an eine breite Zielgruppe von Landwirt:innen, Politiker:innen und Investor:innen kommuniziert werden. Dies trug maßgeblich zur Sensibilisierung für das Potenzial dieser Technologie bei. Akzeptanz und Partizipation wurden unter anderem durch die aktive Einbindung politischer Entscheidungsträger:innen, wie bei Anhörungen im Thüringer Landtag und Gemeinderatssitzungen in Rohrbach, gefördert. Parallel dazu wurden wissenschaftliche Erkenntnisse durch die FH Erfurt in die Praxis übertragen und durch Veranstaltungen wie das Nachhaltigkeitsforum im Oktober 2024 eine breite Öffentlichkeit erreicht. Die geplante Gewinnbeteiligung der Gemeinde unterstreicht zudem die regionale Wertschöpfung. Die geleistete koordinative und administrative Arbeit war von entscheidender Bedeutung für den langfristigen Erfolg des Projekts.

Im Arbeitspaket 5 - Konzept für eine APV-Pilotanlage mit flankierenden F&E-Maßnahmen in Thüringen wurden die Ergebnisse aller vorherigen Arbeitspakete, mit Fokus auf landwirtschaftliche Praxis, Agri-PV Technik, Wirtschaftlichkeit und Regulationen zusammengeführt und in einem umfassenden Konzept für die Implementierung von Agri-PV-Anlagen in Thüringen zusammengefasst (Angang III). Dabei wurden die spezifischen Anforderungen der Landwirtschaft sowie die lokalen Gegebenheiten berücksichtigt. Das Konzept bietet eine solide Grundlage für die zukünftige Umsetzung von Agri-PV-Projekten in Thüringen.

4. Auswertung und Diskussion

Der Projektstart, ursprünglich für August 2023 vorgesehen, verzögerte sich aufgrund eines Aufschubs bei der Bewilligung von Fördermitteln. Die Zuwendung wurde schließlich am 29. Dezember 2023 bewilligt. Um die Projektziele trotz der Verzögerung zu erreichen, wurde die Gesamtlaufzeit um drei Monate verlängert. Ein Wechsel im Projektmanagement, bedingt durch Elternzeit, führte zu einer Anpassung der geplanten Aktivitäten. Insbesondere die Reisekosten konnten aufgrund der Einarbeitungsphase nicht vollständig ausgeschöpft werden. Ausgaben für Öffentlichkeitsarbeit blieben unter den ursprünglichen Erwartungen, da Designarbeiten intern realisiert wurden. Eine geplante Überarbeitung der Website musste aufgrund eines unvorhergesehenen Krankheitsfall des Dienstleisters verschoben werden. Raummieten fielen während des Projektzeitraums nicht an.

Für das Projekt war ursprünglich in Abstimmung mit dem Eigentümer TLLLR ein Areal von ca. 50 ha vorgesehen. Auf dieser Grundlage wurden die notwendigen Arbeitsschritte zur Realisierung des Konzeptes durchgeführt. Im Frühsommer 2024 zeichnete sich eine grundsätzliche Änderung des Nutzungskonzeptes für die ursprünglich vorgesehenen Flächen beim Eigentümer TLLLR ab. Diese Entwicklung machte eine veränderte Planung bezüglich der verfügbaren Fläche des Projektes erforderlich, da das zuvor identifizierte Areal für die Realisierung der Agri-PV nicht mehr zur Verfügung stand.

Um die Projektziele dennoch zu erreichen, wurden alternative Flächen des TLLR eingehend analysiert. Eine bevorzugte Versuchsfläche konnte identifiziert werden. Aufgrund dieser veränderten Rahmenbedingungen wurde bewusst darauf verzichtet, sich auf eine spezifische Fläche zu fixieren. Stattdessen wurden die Flächenproblematiken und Einspeisebedingungen allgemeingültig betrachtet, um eine größtmögliche Übertragbarkeit des Konzepts (s. Anhang III) auf unterschiedliche Standorte in Thüringen zu gewährleisten. Vorarbeiten zur Flächenfindung und zur Arbeit innerhalb einer konkreten Fläche dienten als Grundlage für die Entwicklung allgemeingültiger Lösungsansätze, die in das Konzept eingeflossen sind.

Die bisher erarbeiteten Ergebnisse gelten in wesentlichen Teilen auch für mögliche Alternativflächen. Die Änderung der Fläche hat dazu geführt, dass detaillierte Planungen wie die Netzverträglichkeitsprüfung, die Entwicklung eines Einspeisekonzepts und die Ermittlung geeigneter Netzanschlusspunkte nicht durchgeführt werden konnten. Das finale Konzept ist daher allgemeiner gehalten und bietet einen Rahmen für eine breite Anwendbarkeit im ländlichen Raum Thüringens.

Die Ergebnisse des *Agri-PVThue*-Projekts reihen sich ein in die aktuellen Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Agri-Photovoltaik. Sie bestätigen internationale Trends und liefern gleichzeitig spezifische Erkenntnisse für den Thüringer Kontext. Die gewonnenen Daten können dazu beitragen, die politischen Rahmenbedingungen für Agri-PV in Thüringen zu optimieren und Förderprogramme gezielter auszurichten. Insbesondere im Hinblick auf die Energiewende und den Klimaschutz bieten die Ergebnisse wichtige Impulse für die weitere Entwicklung nachhaltiger Landnutzungskonzepte.

5. Fazit

Das *Agri-PVThue*-Projekt hat umfassende Einblicke in die praktische Umsetzung von Agri-Photovoltaik in Thüringen geliefert. Durch die enge Zusammenarbeit mit Landwirt:innen und Landwirten konnten spezifische Bedürfnisse und Herausforderungen identifiziert werden. Hierbei kristallisierten sich vor allem die Anforderungen an die Arbeitsgeräte, die geeigneten Kulturen sowie die Notwendigkeit von Investments in wissenschaftliches Monitoring heraus. Die Flächenfindung erwies sich als eine der größten Herausforderungen. Naturschutzfachliche Kriterien wie der Schutz von Feldhamstern, Vögeln und der allgemeinen Biodiversität mussten sorgfältig berücksichtigt werden, stellten aber im Fall der Agri-PV kein Problem dar. Zudem war die Verfügbarkeit von Flächen und die bestehenden Nutzungsrechte entscheidende Faktoren. Durch das Projekt konnte ein starkes Netzwerk zwischen Landwirt:innen, Wissenschaftler:innen, Unternehmen und politischen Entscheidungsträger:innen aufgebaut werden. Dieser Austausch war von zentraler Bedeutung für den Erfolg des Projekts und trug zur Stärkung des gesellschaftlichen Diskurses über Agri-PV bei. Darüber hinaus wurden die politischen Rahmenbedingungen für Agri-PV in Thüringen analysiert und Handlungsempfehlungen für eine gezieltere Förderung und Regulierung dieser Technologie entwickelt.

Insgesamt hat das *Agri-PVThue*-Projekt gezeigt, dass Agri-Photovoltaik in Thüringen ein großes Potenzial besitzt und auf Interesse vieler verschiedener Stakeholder stößt, um die Energiewende voranzutreiben und gleichzeitig die Landwirtschaft zu unterstützen. Die

Ergebnisse des Projekts liefern wichtige Erkenntnisse für die weitere Entwicklung und Verbreitung dieser Technologie.

In einem Folgeprojekt (*Agri-PVThue – PraxisPlus*) soll das erarbeitete Konzept umgesetzt werden und zusätzlich weitere Faktoren, wie beispielsweise das Wassermanagement und die Wasserrückhaltefähigkeit des Bodens, berücksichtigen. Dabei sollen nach Errichtung der im Konzept beschriebenen Agri-PV-Anlage durch einen Investor, extensive wissenschaftliche Monitoringarbeiten über einen Zeitraum von mindestens drei Jahren durchgeführt werden. Das wissenschaftliche Monitoring bezieht sich vor allem auf das Mikroklima, den Boden, die Wasserbedingungen, die Qualität und Quantität der landwirtschaftlichen Erträge, sowie epigenetische Faktoren.

Die erzielten Ergebnisse sollen durch eine Hochschule oder eine wissenschaftliche Institution evaluiert, ausgearbeitet und im Folgenden publiziert werden, um den maximalen Nutzen aus einer in Thüringen angesiedelten innovativen Agri-PV Anlage zu schöpfen.

6. Literaturverzeichnis

Ludzuweit, A. G., Paterson, J., Wydra, K., Pump, C., Müller, K., & Miller, Y. (2024). *Quantifying*

the Impact of Habitat-Enhancing Strategies on the Ecosystem Services in Agrivoltaic

Systems a Case Study Focusing on North-Eastern Germany.

<https://doi.org/10.2139/ssrn.4965801>

Solarpower Europe 2024 (Hrsg.). (2024). *Agrisolar Handbook.*

TLUBN, T. L. für U., Bergbau und Naturschutz. (2020). *Zukünftiges Klima | Thüringer*

Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz.

Trommsdorff, M., Gruber, S., Keinath, T., Hopf, M., Herrmann, C., Schöneberg, S., Gudat, C.,

Torres Boggio, A., Gajewski, M., Högy, P., Zikeli, S., Ehmann, A., Weselek, A., Bodmer,

U., Rösch, C., Ketzer, D., Weinberger, N., Schindele, T., & Vollprecht, J. (2024). *Agri-*

Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. 3., 76.

Trommsdorff, M., Hopf, M., Hörnle, O., Berwind, M., Schindele, S., & Wydra, K. (2023). Can

synergies in agriculture through an integration of solar energy reduce the cost of

agrivoltaics? An economic analysis in apple farming. *Applied Energy*, 350, 121619.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121619>

- Vollmer, V. L. (2022). *Agri-Photovoltaik aktueller Forschungs- und Technikstand, sowie fallspezifische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung* [Masterthesis]. Fachhochschule Erfurt.
- Widmer, J., Christ, B., Grenz, J., & Norgrove, L. (2024). Agrivoltaics, a promising new tool for electricity and food production: A systematic review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 192, 114277. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114277>
- Wydra, K., Vollmer, V., Schmidt, S., Prichta, S., Kunze, R., & Aulich, H. (2022). *Potential der Agri-Photovoltaik in Thüringen*.

7. Anhang

I. ÖA Materialien

REGIONALER STROM VOM ACKER



In unserer umfassenden Potenzialstudie aus dem Jahr 2022 haben wir die Möglichkeiten von Agri-PV in Thüringen untersucht. Die Ergebnisse zeigen ein großes Potenzial für die Umsetzung von Agri-PV-Projekten in unserem Bundesland.



hier geht es
zur Potentialstudie

PROJEKTE IN UNSERER REGION

Agri-PVThue:

Pilotanlage zur
Demonstration der
Kombination von
Ackerwirtschaft und
Energieerzeugung.



Beerenklima:

Klimawandelanpassung für
Erdbeeren aus der Region mit
Hilfe von Solarzellen.



© Ángel Medina - SolarInput e.V.
Bio-Obsthof Nachtwey

WERDE MITGLIED IM NETZWERK

www.solarinput.de 

Janina Happ
Projektmanagement Agri-PV 
+49 1573 6700967

Freistaat
Thüringen 

Ministerium
für Infrastruktur
und Landwirtschaft

ELER 
Förderinitiative Ländliche Entwicklung in Thüringen
Europäischer Landwirtschaftsfonds für
die Entwicklung des ländlichen Raumes

Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete.

Abbildung 1 Handout 1/2

WAS IST AGRI-PV?



Agri-Photovoltaik (Agri-PV) kombiniert die Erzeugung von Solarstrom mit der Landwirtschaft. Durch die strategische Anordnung von Solarmodulen über Feldern wird ein optimales Zusammenspiel von Licht, Schatten, Wasser und Luftzirkulation angestrebt. Zusätzlich werden verlässliche Ernteerträge geliefert, der Schutz der Pflanze vor den Folgen des Klimawandels gefördert, und gleichzeitig sauberen Strom bereitstellt.

Die Vorteile im Überblick:

- **Höhere Erträge:** Durch die optimale Nutzung des Sonnenlichts und die Schaffung eines günstigen Mikroklimas können die Erträge in vielen Kulturen gesteigert werden.
- **Schutz vor extremen Wetterbedingungen:** Agri-PV-Anlagen bieten Schutz vor Frost, Hagel, Starkregen und Sonnenbrand.
- **Verbesserung der Bodenqualität:** Durch die Erhöhung der Bodenfeuchtigkeit können die Bodenbedingungen verbessert werden.



© Krinner Carport - Freißing



© AgriPV-Solutions
Obsthof Bernhard - Kressbronn am Bodensee

- **Förderung der Biodiversität:** Die Schattenbereiche unter den Solarmodulen schaffen wertvolle ökologische Nischen. Durch gezielte Maßnahmen wie die Schaffung von Kleinstrukturen bieten Agri-PV-Anlagen Lebensraum für eine Vielzahl von Insekten, Kleintieren und sogar Vögeln und unterstützen somit die Artenvielfalt in der Region.

Freistaat
Thüringen

Ministerium
für Infrastruktur
und Landwirtschaft

ELER 
Förderinitiative Ländliche Entwicklung in Thüringen
Europäischer Landwirtschaftsfonds für
die Entwicklung des ländlichen Raumes

Kooperationspartner: AG Weißensee, Thüringer Bauernverband, SolarInput e.V.,
Enerparc, TLLLR (assoziiierter Partner)

Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete.

Unsere Schwerpunkte

Die Palette nachhaltiger Energielösungen gegen den Klimawandel ist breit gefächert. Innovative Entwicklungen finden täglich Einzug in unser Leben. Solarstrom im Wohnbereich ist nur ein Beispiel dafür. Um den Wandel aktiv mitzugestalten, fokussieren wir uns auf die Themen, die uns im Alltag am meisten berühren: Wasser, Ernährung, Gebäude und Energiespeicherung; stets mit Fokus auf die CO₂-Minderung. Als Schnittstelle zwischen Gesellschaft, Industrie und Wissenschaft fördern wir aktive Beteiligung und Austausch. Denn nur gemeinsam können wir die Herausforderungen der Energiewende meistern und eine nachhaltige Zukunft gestalten.



Sie engagieren sich im Bereich Photovoltaik, Solarthermie und Nachhaltigkeit und möchten etwas gemeinsam mit uns für das Erreichen des 1,5°C Klimazieles bewegen?

UNSERE ANSPRECHPARTNER:INNEN

Janina Happ

AGRI-PHOTOVOLTAIK

Tel.: +49 157 36700967

E-Mail: j.happ@solarinput.de

Phillip-Simon Keitel

GRÜNER WASSERSTOFF

Tel.: +49 160 8709122

E-Mail: p.keitel@solarinput.de

Dr. Hubert Aulich

VORSTANDSVORSITZENDER

Tel.: +49 172 7928935

E-Mail: h.aulich@solarinput.de

Besuchen Sie
unsere Website
für mehr Infos!



SolarEnergie

weiterdenken

Für eine gemeinsame Energiewende
& das Erreichen des 1,5°C Klimazieles



Im SolarInput e. V. bündeln Akteure aus Industrie, Forschung und Wissenschaft ihre Kompetenzen, um Maßnahmen zur CO₂-Reduktion voranzutreiben. Das Netzwerk-Management vom SolarInput übernimmt hauptsächlich Aktivitäten, die auf das Initiieren von Forschungs- und Entwicklungsprojekten mit unterschiedlichen Partnern fokussieren und die den Mitgliedern eine Kooperations- und Kommunikationsplattform in Form von Netzwerk- und Arbeitskreistreffen, Fachveranstaltungen und Messen bietet. SolarInput ist mit seinen langjährigen Erfahrungen und einer vielseitig aufgestellten Wissensbasis in folgenden Bereichen tätig:

- Integrierte Photovoltaik
- Dezentrale Energielösungen
- Teilhabe an der Energiewende
- Internationalisierung
- Klimawandelminderung & -anpassung



Grüner Wasserstoff

Wasserstoffquell- und Wertschöpfungsregion
Main-Elbe-LINK **h₂well Markthub**

H2-Well entwickelt und implementiert mit regionalen Akteuren lokale Wertschöpfungsketten, die neben der grünen Wasserstoffherzeugung und -nutzung auch die Verwendung von Abwärme und des bei der Elektrolyse entstehenden Sauerstoffs umfassen.

Ziel: Entwicklung und Umsetzung einer dezentralen, grünen Wasserstoffwirtschaft in der Region als Schlussstein für eine umfassende Energiewende.



©AdobeStock/478154026



wir! Wandel durch Innovation in der Region

Agri-Photovoltaik

"Strom vom Acker" (Agri-Photovoltaik) mit Fokus auf Ernteschutz ist ein wichtiger Schwerpunkt für uns. In Zusammenarbeit mit Landwirt:innen wird Solarstrom mit dem Anbau von Pflanzenkulturen verknüpft. Unter Mitwirkung von Prof. Dr. Kerstin Wydra werden erste Forschungs- und Demonstrationsprojekte in Thüringen umgesetzt, darunter "Agri-PVThue" und "BeerenKlima", sowie eine umfassende Potentialanalyse der Agri-PV in Thüringen. Darüber hinaus steht SolarInput im Dialog mit der Politik zur Unterstützung der Energiewende und dem Ausbau der Photovoltaik. Das Netzwerk bietet Beratung und Vernetzung von Agri-Photovoltaik-Interessierten mit regionalen Akteuren.



©Angel Medina - Solarinput e.V. / Bio-Obsthof Nachwey



Freistaat Thüringen
Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft

Abbildung 3 Flyer



AGRI-PHOTOVOLTAIK IN THÜRINGEN

NACHHALTIGE
ENERGIEERZEUGUNG AUF DEM
ACKER

Was ist Agri-PV?

Die innovative
Kombination von
Landwirtschaft und
Energieerzeugung.

Lernen aus der
Praxis – Mit unseren
Pioniervorhaben wie
Agri-PVThue und Beeren-
klima möchten wir die
regionale Entwicklung und die
Energiewende in Thüringen
stärken. Dabei steht der Schutz
der Pflanzen vor
Klimaextremen bei uns im
Vordergrund.

Neugierig geworden?
Sprechen Sie uns an!
Oder erfahren Sie mehr auf
unserer Website:
www.solarinput.de



Freistaat
Thüringen



Ministerium
für Infrastruktur
und Landwirtschaft

ELER 
Förderinitiative Ländliche Entwicklung in Thüringen
Europäischer Landwirtschaftsfonds für
die Entwicklung des ländlichen Raumes

Hier investiert Europa in die ländlichen Gebiete.

Abbildung 4 Roll Up

- II. **Konzept: „Agri-PVThue“ Innovative Konzepte zum Schutz der Pflanzenkulturen bei gleichzeitiger Stromerzeugung auf Ackerflächen in Thüringen: Agri-Photovoltaik**



„Agri-PVThue“

Innovative Konzepte zum Schutz der Pflanzenkulturen bei gleichzeitiger Stromerzeugung auf Ackerflächen in Thüringen: Agri-Photovoltaik

Kontakt:

SolarInput e.V.

Gustav-Tauschek-Str. 2

99099 Erfurt

Tel.: 0172 7928935

E-Mail: info@solarinput.de

Web: www.solarinput.de



Freistaat
Thüringen



Ministerium
für Infrastruktur
und Landwirtschaft

Verfasser*innen:**Name****Institution**

Leon Bruno Hoffmann

SolarInput e.V.

Janina Happ

SolarInput e.V.

Prof. Dr. Kerstin Wydra

SolarInput e.V., FH Erfurt

Vera Romeike

SolarInput e.V.

Dr. Hubert Aulich

SolarInput e.V.

Daniel Dechmann-Annus

Enerparc

Dr. Stefan Ehrentraut

FGK

Dr. Katja Burow

FGK

Dr. Anna Kodisch

Pharmaplant

Prof. Dr. Björn Machalett

FH Erfurt

Prof. Axel Klapka

FH Erfurt

Hannes Frömchen

FH Erfurt

Dr. Sabine Schmidt

MFPA

Stand: 30.01.2025

Version vom: 30.01.2025

Zusammenfassung

Die Konzeptstudie *Agri-PVThue* widmet sich der Untersuchung der dualen Nutzung von Ackerflächen in Thüringen zur Erzeugung von Nahrungsmitteln und Strom aus Photovoltaik auf derselben Fläche. Ziel ist es, eine nachhaltige und wirtschaftlich tragfähige Nutzung landwirtschaftlicher Flächen in Kombination mit dem Einsatz innovativer Erneuerbarer Energien unter den Bedingungen in Thüringen zu gewährleisten und einen signifikanten Beitrag gegen den Klimawandel zu leisten. Das Konzept soll Landwirt:innen, Kommunen und anderen Akteur:innen als Orientierung dienen, um die Integration von Photovoltaik in die landwirtschaftliche Produktion zu erleichtern.

Für die landwirtschaftliche Nutzung in Thüringen, insbesondere auf den dort üblichen großen Schlägen, haben sich hoch aufgeständerte APV-Systeme mit der Sonne nachgeführten Modulen (1 P Tracker) und großen Durchfahrtsbreiten als besonders geeignet erwiesen. Diese Bauweise ermöglicht den Einsatz breiter Arbeitsgeräte und optimiert gleichzeitig die Sonneneinstrahlung für die Stromerzeugung.

Diese Anlagen bieten den Pflanzen Schutz vor extremen Wetterbedingungen und erhöhen die Landnutzungseffizienz durch doppelte Nutzung der Flächen. Es werden spezifische Anforderungen wie die Minimierung von Flächenverlusten, die Erhaltung landwirtschaftlicher Produktivität und die Integration von Biodiversitätsmaßnahmen hervorgehoben. Förderungen und gesetzliche Vereinfachungen, etwa im Rahmen des EEG und des Solarpakets I, sollen die Akzeptanz und Verbreitung von Agri-PV vorantreiben.

Dieses Konzept untersucht sowohl die Chancen, wie bereits in Studien weltweit beschrieben, als auch die Herausforderungen von Agri-PV-Anlagen, um deren positive Auswirkungen auf die Landwirtschaft und den Umweltschutz zu maximieren. Dabei werden Themen wie Boden- und Wasserhaushalt sowie Naturschutz adressiert. Neben technischen Spezifikationen werden auch ökologische, genehmigungsrechtliche und ökonomische Aspekte berücksichtigt, einschließlich Standortprüfung und Boden- und Klimamonitoring in einer forschungsbegleiteten Phase.

Auch Maßnahmen zur Vereinbarkeit von Agri-PV mit naturschutzfachlichen Anforderungen sind Bestandteil des Konzeptes. Zudem wird auf Umwelt- und Baurecht sowie auf Fördermöglichkeiten durch das EEG sowie Änderungen durch das Solarpaket I eingegangen.

Zusammenfassend strebt das Konzept an, eine Synergie zwischen Landwirtschaft, Energieproduktion und Klimaschutz aufzuzeigen und legt den Grundstein für eine nachhaltige Weiterentwicklung von APV-Systemen in Thüringen.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	iii
Abkürzungsverzeichnis.....	C
Abbildungsverzeichnis.....	D
Tabellenverzeichnis	E
1) Landwirtschaftliche Basisdaten in Thüringen	1
2) DIN SPEC	6
2.1) Anforderungen an APV-Anlagen nach DIN SPEC	7
2.2) APV-Förderung im Rahmen des EEGs vor dem Solarpaket I.....	10
2.3) APV-Förderung im Rahmen des EEGs nach dem Solarpaket I.....	11
3) Standortprüfung.....	13
4) Konzept zu naturschutzfachlichen Aspekten	17
4.1) Mikroklima	17
4.2) Boden und Anlagenbau	17
4.3) Scoping von Natur und Umwelt	19
4.4) Fauna und Flora.....	19
4.4) Landschaftsbild in der Agrarlandschaft	21
5) Konzepterstellung Anlagentechnik	24
6) Agrartechnik (landwirtschaftliche Geräte & Maschinen, Pflanzenschutz)	31
7) Fruchtfolge	34
8) Prüfung Ertragsaussichten.....	38
8.1) Energieertrag	38
8.2) Landwirtschaftlicher Ertrag	40
9) Wassermanagementsystem	46
9.1) Monitoring Wassermanagment	47
10) Wirtschaftliche Betrachtung	49
10.1) Eckdaten	49
10.2) Geschäftsmodelle	50
10.3) Kostenbetrachtung	52
10.4) Wertschöpfung.....	55
11) Messkonzept flankierende F&E Maßnahmen	57
11.1) Basis Konzept	57

11.2) Maximalkonzept	57
11.3) Wissenschaftliches Monitoring von Wasserversorgung und Bodenfaktoren.....	58
12) Handlungsempfehlungen für verschiedene Akteur:innen zur Förderung von Agri-Photovoltaik	62
12.1) Für die Politik: Regelungen / Priorisierungen optimieren	62
12.2) Für die Wirtschaft: Anreize schaffen	62
12.3) Für Investoren und Anlagenbauer: Hürden, Potentiale und Vorgehen darstellen	63
12.4) Für Gemeinden: Akzeptanzsteigerungsmaßnahmen und Partizipationsmöglichkeiten entwickeln	63
12.5) Für Behörden: Bauleitplanung, Umweltplanung, Genehmigungsplanung	64
12.6) Für Landwirt:innen / Landwirtschaft: Hürden, Potentiale und Geschäftsmodelle aufzeigen.....	64
13) Quellenverzeichnis.....	a
14) Anhang des Gesamtkonzeptes „Agri-PVThue“:	n
a) Basiskonzept für die Bewirtschaftung einer Agri-PV Anlage durch das Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR)	n
b) Maximalkonzept für das Vorhaben: „Agri-PVThue - Innovative Konzepte zum Schutz der Pflanzenkulturen bei gleichzeitiger Stromerzeugung auf der Ackerfläche in Thüringen: Agri-Photovoltaik“	n
c) Gutachten zur Eignung von Ackerkulturen in Agri-Photovoltaik Anlagen	n
d) Wassermanagement - Agri-PVThue Regenwassermanagement im Kontext von Agri-Photovoltaik (APV) Anlagen in Thüringen	n
e) Boden- und Klimamonitoring im Kontext von Agriphotovoltaik (APV) Anlagen	n
f) Naturnahe Gestaltung von Agri-PV-Anlagen: Zusätzliche Maßnahmen zum Schutz von Feldhamster und Vogelwelt.....	n
g) Stellungnahme des Landschaftspflegeverbandes Mittelthüringen	n
h) Leistungsportfolio MFPA.....	n

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung

Agri-PV/ APV
DIN SPEC

dt
FF-PV
FGK

FH Erfurt
GW
ha
KULAP
kWp
MFPA
MW
MWp
PAR
TLLLR

TLPVG
W

Erklärung

Agri-Photovoltaik
Deutsches Institut für Normung
Spezifikation
Dezitonnen
Frei Flächen Photovoltaik
Forschungsstelle für gartenbauliche
Kulturpflanzen
Fachhochschule Erfurt
Giga Watt
Hectar
Kulturlandschaftsprogramm
Kilowatt Peak
Materialforschungs- und Prüfanstalt
Mega Watt
Mega Watt Peak
Photosynthetisch Aktive Strahlung
Thüringer Landesamt für Landwirtschaft
und Ländlichen Raum
Thüringer Lehr- Prüf- und Versuchsgut
Watt

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Bodennutzungshaupterhebung Thüringen	1
Abbildung 2 Sonne ernten auf zwei Etagen – Agrophotovoltaik steigert die Landnutzungseffizienz um über 60 Prozent	4
Abbildung 3 Darstellung APV-Anlage der Kategorie I nach DIN SPEC 91434	10
Abbildung 4 Bodenschutzplatten zur Verwendung gegen Bodenverdichtungen	18
Abbildung 5 Beispiel für die standortangepasste Gestaltung durch Umpflanzung mit strauchigen Strukturen einer PV-FFA bzw. APV mit Heckenpflanzungen	23
Abbildung 6 Doppelernte und Schletter im bayrischen Althegeenberg ein zwei Hektar großen Acker mit 750 Kilowatt Agri-Photovoltaik-Anlage	25
Abbildung 7 Hochaufgeständerte Agri-PV Anlage Hofgemeinschaft Heggelbach.	27
Abbildung 8 Mögliche Schutzwirkungen der Module für die Kulturen durch verschiedene Ausrichtungswinkel bei Tracking-Systemen	39
Abbildung 9 Entwicklung der Niederschläge und der Globalstrahlung in Deutschland seit 1991	40
Abbildung 10 Kategorisierung der bedeutendsten Ackerkulturen in Thüringen in Abhängigkeit von Schattentoleranz	41
Abbildung 11 Krinner Carport Pilotanlage (exemplarisch)	49
Abbildung 12 Skizze Gestellsystem einer hochaufgeständerten APV-Anlage	50

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Vergleich der Agri-PV System Arten hinsichtlich Investitionskosten und Einfluss auf landwirtschaftliche Faktoren	28
Tabelle 2 Vergleich möglicher Thüringer Ackerkulturen (in Fruchtfolgerotation des TLPVG) hinsichtlich ihrer Eignung für Agri-PV basierend auf der Schattentoleranz	34
Tabelle 3 Überblick über die im Rahmen von <i>Agri-PVThue</i> in Zusammenarbeit mit dem TLLLR und dem TLPVG untersuchten Fruchtfolgen und Kulturen	36
Tabelle 4 Risikoarme Fruchtfolge für mögliche Ackerkulturen in Thüringen	37
Tabelle 5 Mögliche Ertragsveränderungen unter Agri-PV für die Kulturen Winter Weizen, Winter Raps, Kartoffeln, Winter Gerste und Futter Luzerne/ Legumen	43
Tabelle 6 Zusammengefasste Eckdaten	50
Tabelle 7 Geschäftsmodelle und Akteure	51
Tabelle 8 Aufschlüsselung der Anlagenkosten	53
Tabelle 9 Wirtschaftlichkeitsdaten einer modellhaften, hochaufgeständerten APV-Anlage mit Tracking Modulen	54

1) Landwirtschaftliche Basisdaten in Thüringen

Thüringen, mit einer Fläche von 16.202 km², liegt im Zentrum Deutschlands. Über 50% dieser Fläche (8.416 km², Destatis) dienen der Landwirtschaft. Ca. 75 % dieser landwirtschaftlich genutzten Fläche wird zum Anbau von Druschfrüchten (Getreide & Ölfrüchte) genutzt (Thüringer Landesamt für Statistik, 2023) (Abbildung 1).

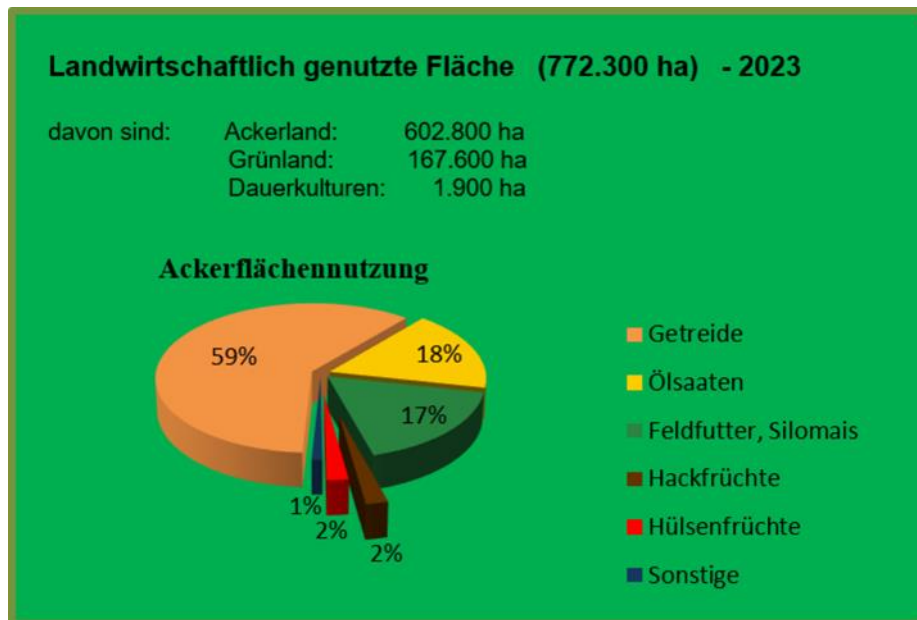


Abbildung 1 Bodennutzungshaupterhebung Thüringen (Thüringer Landesamt für Statistik, 2023)

Diese Kulturen werden auf großen Schlägen angebaut und teils mit großem, modernem Gerät bestellt. Durch den großflächigen Anbau und den Einsatz moderner Landtechnik können Skaleneffekte (Economy of Scale) genutzt werden, um die Ressourceneffizienz zu steigern und höhere Erträge zu erzielen. Allerdings ist diese Art der Landwirtschaft auch weniger klimaresilient als eine diversifizierte Bewirtschaftung, und es ist in Zukunft durch Klimawandel mit Ertragseinbußen zu rechnen.

Die Nutzung von Präzisionslandwirtschaft („Smart Farming bis zum Ladenregal“ Kyffhäuser Nachrichten, 2024) ermöglicht zielgenaue Kulturmaßnahmen und damit nachhaltigere Bewirtschaftung in Bezug auf Düngung und Pflanzenschutz. Die Anwendungsrate dieser Technologie steigt, wird bundesweit allerdings momentan nur auf je nach Definition 8 - 21 % (Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, 2024) der Schläge genutzt. Im Jahr 2023 bewirtschaftete ein durchschnittlicher landwirtschaftlicher Betrieb in Thüringen rund 215 ha Ackerfläche. Dies entspricht einem Anstieg von etwa 6 ha im Vergleich zu den durchschnittlich 209 ha vor 2020.

Die Zunahme der durchschnittlichen Betriebsgröße in Thüringen geht einher mit einem Trend zur Verwendung großer Maschinen und Geräte, so dass immer größere Flächen mit möglichst wenigen, dafür aber leistungsstarken Maschinen bewirtschaftet werden. Dies ist in Thüringen aber auch bundesweit unter anderem auf die Aufgabe von kleinen Betriebseinheiten aufgrund von Nachwuchsmangel in landwirtschaftlichen Betrieben zurückzuführen (Fachkräftemangel

in der Realität deutlich höher als in der Statistik, 2023). Diese Entwicklung wird durch den Einsatz von GPS-gesteuerten Traktoren und anderen Präzisionslandwirtschaftstechnologien unterstützt. Geräte mit Spannweiten von bis zu 36 m sind daher keine Seltenheit und stellen bei stark kompetitiven Getreidepreisen eine Möglichkeit dar, Gewinnmargen zu maximieren. Dies trägt jedoch noch nicht ausreichend zur Anpassung der Landwirtschaft an die Folgen des Klimawandels bei.

Im Norden Thüringens sorgt der schwarzerdige und sehr lösshaltige Boden des Thüringer Beckens vor allem bei Getreidekulturen für hohe Erträge, weshalb dieser großflächige Anbau hier besonders profitabel ist.

Das Thüringer Becken zeichnet sich durch ein mildes Klima mit geringeren Niederschlägen im Vergleich zum deutschen Durchschnitt aus (Ernte in Thüringen 2023 - Witterung, Erträge und Preise, 2023). Diese klimatischen Bedingungen schaffen optimale Voraussetzungen für den Getreideanbau. Im Süden Thüringens hingegen, wo höhere Niederschläge fallen, sind die Anbaubedingungen für andere Kulturen günstiger. Allerdings führte die Trockenheit und Hitze in den Jahren 2018, 2019 dazu, dass die Fruchtbarkeit dieser Böden nicht optimal genutzt werden konnte, und die negativen Auswirkungen des Klimawandels zu Mindererträgen führten, wie in allen von Trockenheit betroffenen Gebieten Deutschlands (statista 2018). Mit extremen Bedingungen in der Vegetationsperiode ist in Zukunft häufiger zu rechnen (Wydra et al. 2022).

Die im Fokus stehende theoretische Demonstrationsfläche im Erfurter Becken dient als Beispiel für die Herausforderungen, denen die Landwirtschaft in vielen Regionen Deutschlands gegenübersteht. Die anhaltende Trockenheit, die in den letzten Jahren auch im Erfurter Becken zu erheblichen Ertragsausfällen geführt hat, macht deutlich, wie wichtig es ist, sich dringend an die verändernden Klimabedingungen anzupassen. Trotz des nassen Sommers 2024 bleibt der Klimawandel eine zentrale Herausforderung für die Landwirtschaft, wie die Trockenheitsphasen der letzten Jahre deutlich gezeigt haben. Der Juli 2023 war weltweit der heißeste Juli seit Beginn der Wetteraufzeichnungen (Ernte in Thüringen 2023 - Witterung, Erträge und Preise, 2023) und ging teils mit einer extremen Variabilität der Niederschläge in Thüringen einher. Während in einigen Regionen, wie Heßberg, eine extreme Trockenheit mit nur 36 % des langjährigen Durchschnitts herrschte, wurden in anderen Gebieten, etwa Dobitschen, mit 177 % des Mittelwerts erhebliche Niederschlagsmengen gemessen.

Die Häufigkeit und Intensität von Starkwetterereignissen wie Hagel, Stürmen, Starkregen und Dürren sowie Frösten zu unüblichen Zeiten nimmt stark zu. So treten beispielsweise Starkregenereignisse immer häufiger im Frühling auf, während Dürreperioden im Sommer länger anhalten (Ernte in Thüringen 2023 - Witterung, Erträge und Preise, 2023). Starkregenereignisse führen zwar zu einer hohen Wassermenge innerhalb kurzer Zeit, jedoch kann der Boden das Wasser nicht ausreichend schnell aufnehmen. Ein erheblicher Teil des Wassers fließt daher oberflächlich ab, was zu verstärkter Erosion beiträgt. Das abfließende Wasser steht den Pflanzen anschließend nicht mehr zur Verfügung (Beisecker, 2020). Dies

verursacht paradoxerweise Trockenheit im Frühjahr, obwohl laut Messmengen genug Regen fällt.

Die wiederholten Trockenperioden und die damit verbundene geringe Grundwasserneubildung haben zur Folge, dass sich die Grundwasserspeicher regelmäßig nicht ausreichend füllen können, was den Trockenstress in den kommenden Jahren weiter verstärken wird.

Vor allem im Jahr 2023 führt Trockenstress zu Ertrags- und Qualitätsverlusten bei Winterweizen und Sommergetreide (Ernte in Thüringen 2023 - Witterung, Erträge und Preise, 2023). Ursächlich hierfür waren vor allem eine verkürzte Kornfüllungsphase, Trockenheit im Juni und Dauerregen im Juli. Des Weiteren können Spätfröste die Blüte von Getreide treffen und zu Mindererträgen führen.

Ohne technische Anpassungen ist davon auszugehen, dass Ertrags- und Qualitätsausfälle in der Landwirtschaft aufgrund des Klimawandels in den kommenden Jahren weiter zunehmen werden. Das Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz (TLUBN, 2020) prognostiziert für Thüringen eine Verstärkung extremer Wetterereignisse: mehr Trockenheit und Dürre im Sommer sowie häufiger auftretende Starkwetterereignisse.

Um den Klimawandel einzudämmen, ist es entscheidend, dass Deutschland aktiv zur Bekämpfung der globalen Klimaveränderungen beiträgt. Derzeit stammen noch über 44 % (Statistisches Bundesamt, 2023) des deutschen Energiemixes aus konventionellen, fossilen Energieträgern. Ein wichtiger Schritt in die richtige Richtung ist daher die zügige Umstellung von fossilen auf erneuerbare Energien. Die Notwendigkeit dieser Transformation wird von der Bundesregierung erkannt und in der Politik verfolgt. Des Weiteren ist eine Anpassung der Landwirtschaft an den Klimawandel notwendig, sowie eine Einkommensstabilisierung für die Landwirt:innen.

Im Gesetz „Sofortmaßnahmen für einen beschleunigten Ausbau der erneuerbaren Energien und weitere Maßnahmen im Stromsektor“ wurde das Ausbauziel für Solaranlagen in Deutschland auf 22 GW pro Jahr erhöht. Bis 2030 sollen somit insgesamt 215 GW an PV-Anlagen installiert werden (§4 Abs. 3d EEG) (Bundesgesetzblatt 2022). Darüber hinaus legen die nationalen Klimaschutzziele eine Reduktion der Treibhausgasemissionen um 65 % bis zum Jahr 2030 fest (§3 Abs. 1 Nr. 1 KSG). Um diese Ziele zu erreichen, ist ein zügiger und vielfältiger Ausbau der erneuerbaren Energien unverzichtbar. Der Ausbau erneuerbarer Energien ist somit nicht nur notwendig, sondern auch dringend geboten.

Agri-Photovoltaik (APV) stellt eine vielversprechende technische Lösung dar, um den genannten Herausforderungen für den Energiesektor sowie der Landwirtschaft zu begegnen.

Kurzdefinition APV

Agri-Photovoltaik (Agri-PV oder APV) ist ein Verfahren, bei dem Ackerflächen sowohl für die landwirtschaftliche Pflanzenproduktion als auch für die Stromerzeugung durch Photovoltaik genutzt werden. Es bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten, je nachdem, wie intensiv die

landwirtschaftliche Nutzung ist und wie viel zusätzlicher Aufwand für den Bau der PV-Anlagen betrieben wird. Die Bandbreite der möglichen Anwendungen reicht von hoch spezialisierten PV-Montagesystemen für den Anbau von Sonderkulturen und intensiven Ackerkulturen bis hin zu flexiblen Lösungen für extensive Beweidung, die nur geringe Anpassungen der konventionellen Photovoltaikanlage erfordern. Agri-PV trägt dazu bei, die Flächeneffizienz zu steigern und ermöglicht gleichzeitig den Ausbau der PV-Leistung, während fruchtbare Ackerflächen für die Landwirtschaft erhalten bleiben (Abbildung 2) und/ oder artenreiche Biotope geschaffen werden können.

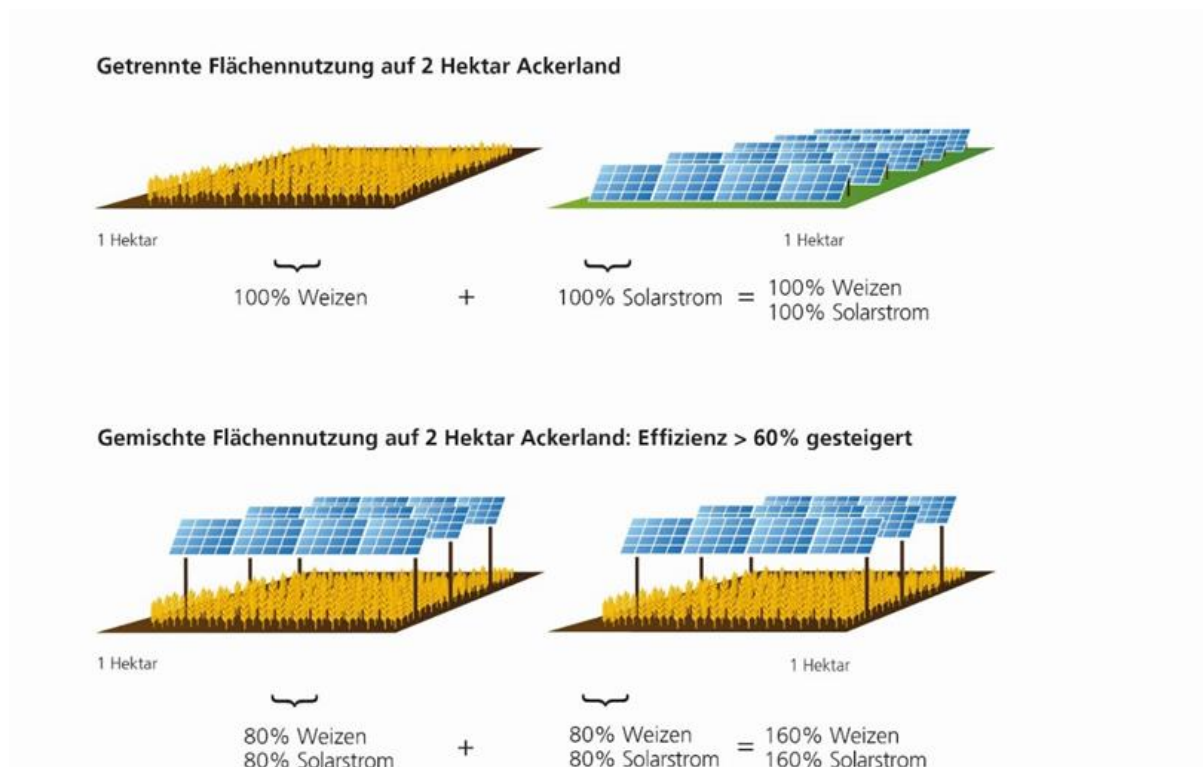


Abbildung 2 Sonne ernten auf zwei Etagen – Agrophotovoltaik steigert die Landnutzungseffizienz um über 60 Prozent - Fraunhofer ISE 2017-11-21

In Kapitel 2 wird dieser Sachverhalt unter Bezugnahme auf die DIN SPEC 91434 detailliert erläutert und verschiedene mögliche Systemtypen werden untersucht. Im Rahmen des vorliegenden Konzepts konzentriert sich die Betrachtung primär auf hoch aufgeständerte APV-Anlagen der Kategorie I gemäß DIN SPEC 91434, welche eine Modulunterkantenhöhe von über 2,1 m aufweisen (siehe Kapitel 2). Das Hauptziel der in diesem Projekt für Thüringen konzipierten APV-Anlage besteht darin, eine größtmögliche Synergie zwischen landwirtschaftlicher Nutzung und Energieproduktion zu erreichen.

Viele bestehende APV-Systeme verfügen über Durchfahrtsbreiten von weniger als 15 m, in der Regel nur 10 bis 12 m, was für den Ackerbau problematisch ist. Dies erfordert häufig eine Anpassung des Maschinenparks oder der Bewirtschaftungsstrategien, was die Synergie zugunsten der Landwirtschaft verringert und zu Flächenverlusten aufgrund der Stützpfeiler führen kann.

Für die Konzeption einer APV-Anlage in Thüringen ist es daher entscheidend, die Durchfahrtsbreiten an die landwirtschaftliche Praxis anzupassen, in der Maschinenbreiten von 30 m keine Seltenheit darstellen. Ziel ist es, ein Anlagenkonzept darzustellen, das Durchfahrtsbreiten von bis zu 30 m und eine Über Kopfhöhe von mindestens 5 m ermöglicht. Dies wird angestrebt, um eine uneingeschränkte Bewirtschaftung unter den Solarmodulen zu gewährleisten, ohne dass eine Umstellung des landwirtschaftlichen Maschinenparks erforderlich ist.

2) DIN SPEC

Die DIN SPEC 91434 ist eine technische Spezifikation, die vom Deutschen Institut für Normung (DIN) entwickelt wurde. Sie legt Kriterien und Anforderungen für die landwirtschaftliche Nutzung im Bereich der Agri-PV fest. Sie schafft Klarheit über die Anforderungen an Agri-PV-Anlagen und sorgt für mehr Sicherheit für alle Beteiligten, wie Landwirt:innen, Betreiber:innen und Genehmigungsbehörden. Die Norm definiert Messkennzahlen für ein Prüfverfahren zur Qualitätssicherung von Agri-PV-Anlagen. Dadurch wird sichergestellt, dass die Anlagen die gewünschten Leistungsmerkmale erfüllen und die landwirtschaftliche Nutzung nicht oder kaum beeinträchtigen. Durch die einheitlichen Kriterien und Anforderungen erleichtert die DIN SPEC 91434 die Planung, den Bau und den Betrieb von Agri-PV-Anlagen. Dies trägt zur beschleunigten Marktentwicklung dieser Technologie bei. Die Norm stellt somit sicher, dass die landwirtschaftliche Hauptnutzung nicht durch den Betrieb der Photovoltaikanlage beeinträchtigt wird. Es werden Anforderungen an die Planung, den Betrieb, die Dokumentation und die Betriebsüberwachung gestellt.

Eine Definition von Agri-Photovoltaik findet sich in der DIN SPEC 91434:2021-05: „Agri-Photovoltaik / Agri-PV / APV: die kombinierte Nutzung einer Landfläche für die landwirtschaftliche Produktion als Hauptnutzung und die Stromerzeugung durch eine Photovoltaikanlage als Sekundärnutzung“ (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2021).

Unter landwirtschaftlicher Fläche versteht man hier Ackerland, Dauergrünland oder Flächen, die mit Dauerkulturen bewirtschaftet werden (ebd.).

Die DIN SPEC dient der Vorbereitung eines Prüfverfahrens und fungiert als Standardwerk für die Dokumentation und Berichterstattung an Genehmigungsbehörden, Gesetz- und Fördermittelgeber sowie zur Überprüfung und Zertifizierung von APV-Anlagen. Ziel der DIN SPEC ist es, die landwirtschaftliche Hauptbewirtschaftung zu gewährleisten, landwirtschaftliche und technische Risiken zu minimieren, und insbesondere das Risiko von missbräuchlichen Benennungen von APV-Systemen zu reduzieren, um Akzeptanzverluste in der Gesellschaft zu vermeiden.

In der GAP (Gemeinsame Agrarpolitik) Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV) wird die Agri-Photovoltaik (APV) als eine auf landwirtschaftlichen Flächen installierte Anlage zur Nutzung von Solarenergie definiert. Diese Anlage darf den Einsatz üblicher landwirtschaftlicher Methoden, Maschinen und Geräte nicht behindern und die landwirtschaftlich nutzbare Fläche gemäß der DINSPEC 91434:2021-5 um maximal 15% reduzieren (siehe §12 (5) GAPDZV). Damit bleiben die Flächen als landwirtschaftliche Flächen anerkannt und eine GAP Förderung wird weiterhin gegeben.

Die verschiedenen Definitionen machen deutlich, dass APV vor allem die Landwirtschaft unterstützen und schützen soll, wobei die landwirtschaftliche Produktion im Mittelpunkt stehen muss. Ist dies nicht der Fall, handelt es sich um eine Photovoltaik-Freiflächenanlage

(PV-FFA), für die andere Vorschriften und Standards gelten (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021).

Abgrenzung zu DIN SPEC 91492 APV und Tierhaltung

Im Rahmen dieses Konzepts wird primär die Anwendung von Agri-Photovoltaik (APV) im Sinne der DIN SPEC 91434:2021-05 betrachtet, wobei die Berücksichtigung der Tier- und Viehhaltung nicht Teil des Konzepts ist. Viele der hier aufgeführten Kriterien könnten jedoch auch auf APV-Systeme im Kontext der DIN SPEC 91492, die sich auf die Nutztierhaltung beziehen, angewendet werden. Dies betrifft insbesondere Aspekte wie die Netzanbindung, das Wassermanagement sowie die Akzeptanz und Partizipation.

2.1) Anforderungen an APV-Anlagen nach DIN SPEC

Unterscheidung zwischen Kategorie I und Kategorie II:

Die DIN SPEC für Agri-Photovoltaik (Agri-PV) definiert zwei Hauptkategorien von Anlagen.

Kategorie I umfasst hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen mit einer Modulunterkante von über 2,1 m (Abbildung 3). Diese Bauweise ermöglicht eine uneingeschränkte Bewirtschaftung der Flächen unter den Modulen mit landwirtschaftlichen Maschinen und bietet gleichzeitig einen optimalen Schutz der darunter liegenden Kulturen vor Starkwetterereignissen und anderen Wetterextremen.

Kategorie II beschreibt niedrig aufgeständerte Agri-PV-Anlagen mit Modulunterkanten unter 2,1 m. Dieser Anlagentyp zeichnet sich durch eine geringere Bauhöhe aus, die eine flexiblere Flächennutzung zwischen den Modulreihen ermöglicht. Aufgrund der fehlenden Überdachung landwirtschaftlicher Kulturen sind größere Durchfahrtsbreiten oft leichter realisierbar, was allerdings den Energieertrag durch weniger Modulreihen verringert. Im Vergleich zu Kategorie I bietet dieser Typ jedoch keinen umfassenden Schutz für die Kulturen.

Die Wahl von Agri-Photovoltaik-Anlagen der Kategorie I im Projekt *Agri-PVThue* orientiert sich an den Bedürfnissen der lokalen Landwirtschaft in Thüringen, welche vor allem auf Getreide und Ölsaatz spezialisiert ist. Die lichte Mindesthöhe von 2,1 m, bzw. über 5 m, gewährleistet den Einsatz gängiger landwirtschaftlicher Maschinen und trägt so maßgeblich zur Wirtschaftlichkeit und Akzeptanz der Technologie bei. Denn die Weiternutzung vorhandener Arbeitsgeräte ist ohne Einschränkungen möglich. Dies, soll zudem zur Beteiligung und Akzeptanz lokaler Landwirt:innen beitragen. Die Planung und Umsetzung der Anlagen erfolgt dabei unter Berücksichtigung der Anforderungen der DIN SPEC 91434, um eine hohe Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion und der Energieproduktion sowie Langlebigkeit der APV-Anlage sicherzustellen. (DIN - Deutsches Institut für Normung, 2021).

Im Folgenden werden die Anforderungen der DIN SPEC 91434 aufgeführt und zusammengefasst:

1. Aufständering:

Sowohl die Modulverteilung als auch der Pfostenabstand müssen an die Anforderungen der jeweiligen landwirtschaftlichen Praxis angepasst werden. Kategorie I erfordert dabei eine mindest-lichte Höhe, um eine sichere Bearbeitung der Fläche zu gewährleisten, während Kategorie II keine Aufständering mit lichter Höhe vorsieht. Die Art der Aufständering muss die optimale Bearbeitbarkeit der Fläche gewährleisten.

2. Flächenverlust:

Der Verlust an landwirtschaftlich nutzbarer Fläche durch Aufbauten darf bei Kategorie I höchstens 10 % der Gesamtprojekfläche, bei Kategorie II 15 % betragen.

3. Bearbeitbarkeit:

Die Fläche muss so gestaltet sein, dass sie vollständig - abzüglich maximal 10% bzw. 15% - landwirtschaftlich bewirtschaftet werden kann.

4. Lichtverfügbarkeit und Homogenität:

Eine hohe Lichthomogenität und ausreichende Lichtverfügbarkeit sind notwendig, um gleichmäßiges Pflanzenwachstum, einheitliche Erntezeitpunkte und gute landwirtschaftliche Praxis zu gewährleisten. Demgegenüber kann zu hohe Lichtintensität, zumeist verbunden mit Trockenheit und Hitze, den Kulturpflanzen schaden. Mit dem zukünftig weiter voranschreitenden Klimawandel ist mit diesen Bedingungen vermehrt zu rechnen. Lichtintensität, Beschattung und Randeffekte sollen beachtet und an die Bedürfnisse der landwirtschaftlichen Erzeugnisse angepasst werden. Wenn diese Anforderungen nicht erfüllt sind, muss das landwirtschaftliche Nutzungskonzept sicherstellen, dass die Nutzung dennoch gewährleistet ist.

5. Wasserverfügbarkeit:

In Zukunft ist generell mit geringeren Niederschlägen und längeren Trockenperioden in der Hauptvegetationszeit zu rechnen. APV-Anlagen haben unter diesen Bedingungen nachweislich zu erhöhter Bodenfeuchtigkeit und besserer Wasserverfügbarkeit für die Kulturpflanzen geführt. Der Einfluss auf die Wasserverfügbarkeit ist abhängig vom Anlagentyp. Eine gleichmäßige Verteilung des Niederschlagswassers ist generell anzustreben. Je nach Kultur kann aber auch der Schutz vor Schäden durch Niederschlag ausschlaggebend sein. Bei hoch aufgeständerten Anlagen und Modulen mit Spalten ist eine gleichmäßigere Wasserverteilung als bei bodennahen Anlagen ohne Modulspalten zu erwarten, wie in Kapitel 8 ausgeführt wird. Tracking Anlagen können je nach Bedarf der Pflanzen bei Regen senkrechter gestellt werden. Zusätzlich können zur Verbesserung der Wasserverteilung technische Bewässerungseinrichtungen installiert und in einer spezifische Einzelfallbetrachtung des Anlagendesigns sowie der Kultur, Anpassungen an die lokalen klimatischen Bedingungen des Standorts durchgeführt werden.

6. Bodenerosion:

Die Anlage kann Bodenerosion durch Abschirmen von Starkregen verringern. Mögliche Erosion und Verschlammung durch Wasserabfluss können durch kulturangepasste Auffangeinrichtungen für Regenwasser und Verteiler sowie Spalten zum Wasserabfluss zwischen den Modulen minimiert werden. Auch eine permanente Vegetationsdecke vermindert bzw. verhindert Erosion.

7. Rückstandlose Auf- und Rückbaubarkeit:

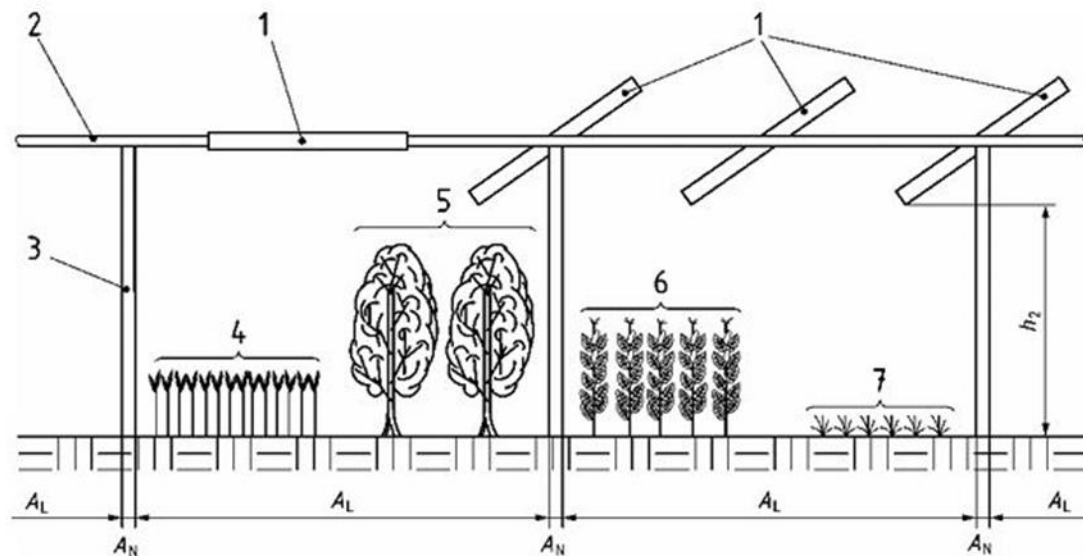
Die Rückbaubarkeit des Agri-PV-Systems muss gewährleistet sein, damit die landwirtschaftliche Nutzung nach dem Abbau im ursprünglichen Zustand bleibt. Vorkehrungsmaßnahmen gegen Bodenverdichtung beim Aufbau sollten ergriffen werden. Bei Verschlechterung der Bodenstruktur während des Auf- oder Abbaus müssen Maßnahmen zur Wiederherstellung ergriffen werden.

8. Kalkulation der Wirtschaftlichkeit:

Im Konzept zur landwirtschaftlichen Nutzung muss ein wirtschaftlich tragfähiger Plan aus der Sicht des Landwirts vorgelegt werden.

9. Landnutzungseffizienz:

Der Ertrag der Kulturpflanzen auf der Gesamt-Projektfläche muss nach dem Bau der Agri-PV-Anlage mindestens 66 % des Referenzertrags (gemittelter Ertrag über 3 Jahre) betragen. Ertragserhöhungen und Ertragsminderungen könnten eintreten. Ertragserhöhungen ergeben sich aus der Schutzfunktion, eine mögliche Ertragsminderung ergibt sich aus dem Verlust an nutzbarer Fläche durch die Anlagenstrukturen sowie durch Faktoren wie Beschattung und ggf. reduzierte Wasserverfügbarkeit.



Legende

- A_L landwirtschaftlich nutzbare Fläche
- A_N landwirtschaftlich nicht nutzbare Fläche
- h_2 lichte Höhe über 2,10 m
- 1 Beispiele zu Solarmodulen
- 2 Verstrebung
- 3 Aufständerung
- 4 bis 7 Beispiele landwirtschaftlicher Kulturen

Abbildung 3 Darstellung APV-Anlage der Kategorie I nach DIN SPEC 91434 vgl. Deutsches Institut für Normung 2021

2.2) APV-Förderung im Rahmen des EEGs vor dem Solarpaket I

Das Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) ist das zentrale deutsche Gesetz zur Förderung erneuerbarer Energien. Durch die Einspeisevergütung erhalten Betreiber von Photovoltaikanlagen für den eingespeisten Strom eine festgelegte Vergütung. Es legt fest, wie der Ausbau von erneuerbaren Energien wie Solarenergie oder Windkraft gefördert wird. Die Höhe der Vergütung hängt von verschiedenen Faktoren ab, wie der installierten Leistung, dem Inbetriebnahmezeitpunkt und der Art der Anlage. Für größere Anlagen ab 1 MWp Leistung gibt es Ausschreibungen, bei denen die Projekte mit den besten Tarifgeboten in einem fixen Ausschreibungsvolumen einen Zuschlag erhalten. Aktuell erhalten APV-Anlagen als besondere Solaranlagen neben der regulären Vergütung einen Technologiebonus. Für die aktuelle Vergütung von Agri PV Anlagen ist das EEG 2023 in der Fassung vom 22.12.2023 heranzuziehen, da eine Genehmigung der EU zum Solarpaket 1 noch aussteht. Wesentliche Änderungen zur Agri-PV sind daher aktuell noch nicht rechtswirksam. Zum jetzigen Zeitpunkt, Stand 13.01.2025 gehören Agri- PV Anlagen über 1 MWp Leistung, wie konventionelle Freiflächenphotovoltaikanlagen zum ersten Segment und erhalten in direkter Konkurrenz mit konventionellen Solarparks im Bieterverfahren ihren EEG Einspeisetarif. Zusätzlich erhalten besondere Solaranlagen einen Technologiebonus von 0,7 ct/kWp.

APV-Anlagen bis 1 MWp müssen nicht am Bieterverfahren teilnehmen. Neben dem Technologiebonus erhalten sie einen festen Stromtarif, der aktuell bei ca. 6,8 ct/kWp liegt. Dieser Tarif ist einer fixen Degradation unterworfen und nimmt daher im Laufe der kommenden Jahre weiter ab. Zusätzlich erhalten sie auch den Technologiebonus von 0,7 ct/kWp und kommen somit auf 7,5 ct/kWp.

2.3) APV-Förderung im Rahmen des EEGs nach dem Solarpaket I

Das im Frühjahr 2024 verabschiedete Solarpaket 1 ist ein Maßnahmenpaket der Bundesregierung, das den Ausbau der Solarenergie in Deutschland weiter beschleunigen soll.

Für Anlagen mit einer Leistung unter 1 MW wird die gesetzlich festgelegte Vergütung (etwa 7 ct/kWp) um 2,5 Cent pro kWp erhöht (§ 48 Abs. 1b EEG). Konkret bedeutet dies für Anlagen, die bis Ende Juli 2024 in Betrieb gehen, einen anzulegenden Wert von ca. 9,5 Cent pro kWh als EEG Einspeisetarif.

Mit der Genehmigung durch die EU des geänderten Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) ergeben sich folgende Konsequenzen für Agri-Photovoltaik (APV):

- **Ausschreibungen für größere Anlagen:** Betreiber von APV-Anlagen mit einer Leistung über 1 MWp müssen an den Ausschreibungen der Bundesnetzagentur teilnehmen. Der Höchstwert für diese Ausschreibungen wurde im Jahr 2024 auf 9,5 Cent pro kWh erhöht, ist jedoch noch nicht rechtskräftig, da die Genehmigung der Europäischen Union hierzu noch aussteht. APV-Systeme werden nun Teil eines eigenen Untersegments, das auch Floating-PV, Carport-PV und Moor-PV umfasst (besondere Solaranlagen nach § 37 Abs. 1 Nr. 3 EEG 2023), und konkurrieren nicht mehr mit herkömmlichen Freiflächen-PV-Anlagen, da sie nach §37 d EEG in einem zweistufigen Zuschlagverfahren als erstes bezuschlagt werden.
- **Höhere Vergütung für APV-Anlagen nach DIN SPEC 91434:** Höhere Vergütungssätze/Förderungen gelten speziell für vertikal ausgerichtete APV-Systeme mit einer lichten Höhe von > 0,8 m. Gleiches gilt auch für Trackinganlagen mit Modulunterkanten über 0,8 m (Kategorie II). Andere APV-Anlagen müssen eine lichte Höhe von mindestens 2,10 m aufweisen, um die erhöhte Vergütung zu erhalten (Kategorie I).
- **Erhöhung der EEG geförderten Anlagengröße:** Die maximal zulässige Größe für Freiflächenanlagen, die an den Ausschreibungen der Bundesnetzagentur teilnehmen dürfen, wird von 20 MW auf 50 MW erhöht.
- **Neue Regelungen für Leitungen und Wegerechte:** Im Gegensatz zum Referentenentwurf von 2023 gilt die Duldungspflicht für die Verlegung von Leitungen und das Wegerecht für erneuerbare Energieanlagen nun ausschließlich für öffentliche Grundstücke.
- **Steigende Gebotsmengen:** Die Gebotsmenge für das Untersegment der APV-Anlagen wird von 300 MWp im Jahr 2023 auf 2075 MWp im Jahr 2029 schrittweise erhöht

werden. Gleichzeitig verringert sich hierdurch der Anteil an Geboten für konventionelle Photovoltaikanlagen.

- **Ausweitung der Flächenkulisse:** Alle landwirtschaftlich benachteiligten Gebiete in Deutschland sind nun für die Errichtung von Solarparks zugelassen. Diese Regelung beinhaltet eine "Opt-Out-Option", die es den Bundesländern ermöglicht, den Ausbau zu begrenzen, wenn ein bestimmter Anteil landwirtschaftlich genutzter Flächen überschritten wird (1 % bis 2030 und 1,5 % danach).
- **Keine zusätzliche Förderung für Biodiversitäts-PV und extensive APV:** Der ursprüngliche Entwurf sah eine zusätzliche Förderung für Biodiversitäts-PV und extensive APV vor, diese wurde jedoch gestrichen. Stattdessen wurden naturschutzfachliche Mindestkriterien für Freiflächenanlagen - dazu zählen nicht die APV-Anlagen - eingeführt, darunter die Umsetzung eines biodiversitätsfördernden Pflegekonzepts für die Fläche der Anlage.

Zusammenfassend schaffen die Änderungen im EEG durch das Solarpaket I neue Anreize, um die finanzielle Attraktivität von APV-Anlagen zu erhöhen, indem es verbesserte Förderbedingungen bietet.

Der Wegfall der zusätzlichen Förderung (Bonus) für die extensive, landwirtschaftliche Nutzung im Kontext von Agri-Photovoltaik-Anlagen und Biodiversitäts-PV stellt eine verpasste Chance dar. Dennoch wird durch die im Solarpaket I verankerten Vereinfachungen der Genehmigungsverfahren und die erhöhten Fördermaßnahmen die Installation von APV-Systemen für landwirtschaftliche Betriebe deutlich attraktiver. Dies dürfte zu einer breiteren Akzeptanz sowie einem beschleunigten Ausbau dieser Technologie führen.

3) Standortprüfung

Die Standortprüfung für Agri-PV-Anlagen umfasst eine umfassende Bewertung verschiedener Kriterien, wie beispielsweise die Eignung der Fläche für eine gleichzeitige landwirtschaftliche Nutzung und Stromerzeugung, die Verfügbarkeit eines Netzanschlusses, die wirtschaftliche Rentabilität sowie die Einhaltung umwelt- und baurechtlicher Vorschriften. Die wichtigsten Schritte im Prüfprozess sind:

1. Flächeneignung und Nutzungsprüfung

Grundlegende Standortanalyse: Zunächst wird die Fläche auf ihre Eignung für Agri-PV hin untersucht. Dies umfasst:

Bodenbeschaffenheit: Der Boden wird auf seine Eignung für eine kombinierte Nutzung von Landwirtschaft und Stromerzeugung durch PV untersucht. Anhand dieser Ergebnisse können dann pflanzliche Kulturen für die Fruchtfolge ausgewählt werden (abhängig von Bodenfruchtbarkeit, pH-Wert usw.), die auch unter den neuen Bedingungen akzeptable (s. DINSPEC 91434) Erträge erwarten lassen. Diese Überprüfung der landwirtschaftlichen Standortbedingungen hilft weiter von vornherein sicherzustellen, dass die landwirtschaftliche Nutzung fortgesetzt werden kann.

Topographie: Die Geländebeschaffenheit (Höhenunterschiede, Neigung) wird überprüft. Ein flaches oder flachwelliges Relief wird bevorzugt, da stärkere Höhenunterschiede die Planung erschweren, Kosten erhöhen und erhöhte Bodenerosion bei Starkregenereignissen verursachen können. Neue Designs für Anlagen an Hängen wurden schon entwickelt.

Zugänglichkeit für Maschinen: Es muss ausreichend Platz für landwirtschaftliche Maschinen und Geräte unter und zwischen den Modulreihen bestehen, um die Bewirtschaftung nicht zu behindern. Auch Wendeflächen für Geräte vor und hinter den Modulreihen sind von großer Bedeutung und sollten bei der Konzeptionierung berücksichtigt werden.

Zugänglichkeit für den Anlagenbetreiber: Der Anlagenbetreiber muss jederzeit Zugang zur Fläche haben, um Wartungsarbeiten durchzuführen. Es muss im Vorfeld abgestimmt werden, wie der Betrieb der Anlage parallel mit dem landwirtschaftlichen Betrieb funktionieren soll.

2. Prüfung der Anschlussmöglichkeiten ans Stromnetz

Netzanschlussprüfung: Die Anbindung der Agri-PV-Anlage ans Stromnetz ist ein entscheidender Faktor. Bevor das Projekt in die Entwicklung gehen kann, wird vorab eine Netzverträglichkeitsprüfung vom Netzbetreiber durchgeführt. In der Regel wird das Mittelspannungsnetz und das Hochspannungsnetz geprüft, um den preisgünstigsten Einspeisepunkt zu ermitteln. Ein Einspeisepunkt im Mittelspannungsnetz findet in der Regel bei Leistungen zwischen 1 bis 10 MWp Leistung der Anlage statt. Ab 10 MWp Leistung sinkt die Wahrscheinlichkeit rapide, eine Anlage im Mittelspannungsnetz einspeisen zu lassen. Ein Umspannwerk muss dann neben der APV-Anlage errichtet werden, um den Mittelspannungsstrom auf die nächsthöhere Spannungsebene der Hochspannung

einzuspeisen. Aus diesem Umstand ergeben sich für die Einspeisung Trassenlängen, die bei Großanlagen bis zu 30 km und länger sein können. Zu lange Stromtrassen können eine Freiflächenphotovoltaikanlage schnell unwirtschaftlich werden lassen. Daher ist der Einspeisepunkt von zentraler Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit eines Freiflächenphotovoltaikprojektes. Für den Bau der Trasse und eines eventuell notwendigen Umspannwerkes sind Baugenehmigungen erforderlich, die wiederum eine Umweltplanung mit sich führen.

3. Einordnung von APV-Anlagen in die Bauleitplanung

Anlagen im Außenbereich: In der Regel liegen Landwirtschaftsflächen im unbeplanten Außenbereich der Kommunen und Landkreise. Daher ist grundsätzlich erst einmal davon auszugehen, dass APV-Anlagen einen Bebauungsplan benötigen, um ein Baurecht zu schaffen.

Anlagen nach §35 BauGB Bauen im Außenbereich als privilegiertes Vorhaben

Mit der letzten Novellierung des Baugesetzbuches 2023 wurde der § 35 BauGB um Freiflächenphotovoltaikanlagen an Autobahn- und Eisenbahntrassen im 200 m Geltungsbereich erweitert. Der § 35 BauGB regelt privilegierte Vorhaben im Außenbereich, die keinen Bebauungsplan benötigen. Darüber hinaus können APV-Anlagen als an sich privilegiert umgesetzt werden, wenn sie eine Anlagengröße von 25.000 m² nicht überschreiten und sich im räumlichen Zusammenhang eines landwirtschaftlichen Betriebes befinden. Man kann davon ausgehen, dass der räumliche Zusammenhang bei 200 bis 300 m vom Landwirtschaftsbetrieb immer noch gewahrt bleibt.

Der Umweltplanung ist Bestandteil im gesamten Genehmigungsprozess einer APV-Anlage und beginnt bereits bei der Auswahl von Potenzialflächen. Umwelt- und Naturschutzaspekte werden in Kapitel 4 erläutert.

4. Baugenehmigung von Agri-PV-Anlagen

Aus der Bauleitplanung heraus wird die Genehmigungsplanung für Freiflächenphotovoltaikanlagen entwickelt. Wo bei der Bauleitplanung das „Was wird gebaut“ und „Wo wird gebaut“ im Vordergrund steht, steht bei der Genehmigungsplanung das „Wie wird gebaut“ im Vordergrund. Bei privilegierten Vorhaben nach §35 BauGB wird das „Was“, „Wo“ und „Wie“ im Genehmigungsverfahren geklärt.

Die Genehmigungsplanung wird durch die Landesbauordnung geregelt. Es steht der Schutz der Allgemeinheit mit all seinen Schutzgütern im Vordergrund. Allerdings wurde gesetzlich geregelt: „Besondere Bedeutung der erneuerbaren Energien“

„Die Errichtung und der Betrieb von Anlagen [...] liegen im überragenden öffentlichen Interesse und dienen der öffentlichen Gesundheit und Sicherheit. Bis die Stromerzeugung im Bundesgebiet nahezu Treibhausgas neutral ist, sollen die erneuerbaren Energien als vorrangiger Belang in die jeweils durchzuführenden Schutzgüterabwägungen eingebracht werden ... “ (EEG 2023, §2). Zu den nachrangigen Schutzgütern zählen u.a., m.E.:

Wasserschutzgebiete, Landschaftsbild, Denkmalschutz, Forstrecht, Immissionsschutzrecht, Naturschutzrecht, Baurecht, Straßenrecht.

Diese gesetzliche Regelung ist bei der Bauleitplanung und der Genehmigungsplanung zu berücksichtigen. Wenn eine entsprechende Abwägung zu Boden, Wasser, Luft, und Landschaftsbild erfolgt, sollte dies auch unter den Aspekten der positiven Auswirkungen auf diese Schutzgüter durchgeführt werden. Rechte Dritter, wie im Boden bereits verlegte Medien oder in der Nähe befindliche Anlagen Dritter sind zu beachten. Aspekte wie Brandschutz müssen behandelt werden. Schall und andere möglich Störungen in der Bauphase sollten vermieden werden. Blendemissionen sind bei den heutzutage produzierten Modulen kein Problem mehr. Sollte das Vorhaben ohne Bebauungsplanung zur Baugenehmigung geführt werden, sollte eine Trägerbeteiligung öffentlicher Belange durchgeführt werden, um sicherzustellen, dass das Vorhaben alle öffentlichen baurechtlichen Aspekte berücksichtigt.

Agrarförderung und Subventionen:

Förderungen und Subventionen, einschließlich der GAP-Förderungen, werden seit Januar 2023 auch für landwirtschaftliche Flächen unter Agri-Photovoltaikanlagen (APV) gewährt. Voraussetzung hierfür ist, dass die APV-Anlage die Anforderungen der DIN SPEC erfüllt und die Ertragsverluste der landwirtschaftlichen Kulturen ein Drittel des vorherigen Ertrags nicht überschreiten.

In Fällen von Unsicherheiten hinsichtlich potenzieller Probleme im Zusammenhang mit dem Erlöschen von Förderungen aufgrund von Landnutzungsänderungen können lokale Ministerien oder Bauernverbände als Ansprechpartner konsultiert werden. In Thüringen bieten sich hierfür insbesondere das Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR), das Thüringer Ministerium für Infrastruktur und Landwirtschaft (TMIL) sowie der Thüringer Bauernverband als geeignete Institutionen an.

Wirtschaftliche Machbarkeitsanalyse

Kosten-Nutzen-Analyse: Es wird eine Wirtschaftlichkeitsberechnung durchgeführt, die die Investitionskosten, Betriebskosten sowie die zu erwartenden Erträge (z. B. Stromertrag und landwirtschaftliche Erträge) berücksichtigt.

Fördermöglichkeiten und Einspeisevergütung: Die Verfügbarkeit von Förderungen (z. B. durch das EEG) und die Höhe der Einspeisevergütung werden geprüft, um die wirtschaftliche Rentabilität sicherzustellen.

5. Akzeptanz der lokalen Bevölkerung

Die Zustimmung und Akzeptanz der lokalen Bevölkerung und der Landwirt:innen sind entscheidend. Es sollte eine frühzeitige Einbindung und Kommunikation mit den Anwohnern erfolgen, um mögliche Bedenken und Widerstände zu vermeiden. Dieser Dialog könnte mithilfe bzw. in Absprache mit dem Gemeinderat und / oder Bürgermeister:innen geschehen.

6. Technische Prüfung der Anlagenplanung

Auswahl des APV-Systems: Es wird geprüft, welche Art von APV-Anlage (z. B. fest installierte Module oder nachgeführte Systeme) am besten dem Bedarf der Pflanzen und ökonomischen Kriterien gerecht wird.

Modulplanung und Reihenanordnung: Die Anordnung der Module (Abstände, Höhe) wird so geplant, dass möglichst die landwirtschaftliche Nutzung optimiert und der Energieertrag maximiert werden.

Infrastrukturplanung: Es müssen Zufahrtswege, Wartungsmöglichkeiten und eine mögliche Integration von Bewässerungssystemen geplant werden.

7. Langfristige Nutzung und Betrieb

Wartung und Instandhaltung: Es wird ein Konzept für die langfristige Wartung und Pflege der Anlage erstellt, um einen reibungslosen Betrieb zu gewährleisten.

Betriebskosten: Eine Kalkulation der laufenden Kosten für Wartung, Versicherung und gegebenenfalls die Pacht der Flächen wird durchgeführt.

Fazit und Empfehlungen für die Standortwahl

Die Standortprüfung für Agri-PV ist ein umfassender Prozess, der technische, wirtschaftliche, rechtliche und ökologische Aspekte integriert. Erfolgreiche Projekte setzen eine detaillierte Planung und Berücksichtigung aller genannten Faktoren voraus. Die besonderen Bestimmungen des EEG 2023 §2 sind dabei zu berücksichtigen.

Die Identifikation von Potenzialflächen wird erheblich erleichtert und präzisiert, je mehr naturschutzfachliche Geodaten im Vorfeld für die Fernerkundung der Flächen zur Verfügung stehen. Hierzu gehören insbesondere Schutzgebietsausweisungen auf regionaler, bundesweiter und europäischer Ebene, sowie ein Verzeichnis geschützter Biotope, Fundpunkte geschützter Arten und ein Verzeichnis geschützter Landschaftsbestandteile. Grundsätzlich sind in der Nähe größerer Schutzausweisungen, insbesondere an größeren Gewässern, mehr sensible Arten zu erwarten. Grundsätzlich sollten reine Ackerflächen ohne andere eingelagerte Biotopstrukturen präferiert werden, da ein Entfernen dieser Biotope genehmigungsrelevant ist und insbesondere Gehölzentfernungen durch die zuständige Behörde untersagt werden können. Mehr Informationen dazu finden sich in Kapitel 4.

4) Konzept zu naturschutzfachlichen Aspekten

4.1) Mikroklima

Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass Agri-PV-Anlagen vielfältige Auswirkungen auf die Bodenbeschaffenheit haben können. Sowohl physikalische, chemische als auch biologische Eigenschaften des Bodens können durch den Bau und Betrieb der Anlagen beeinflusst werden. Diese Effekte sind häufig positiv; Studien zeigen beispielsweise, dass die Wasserkapazität von Böden unter APV-Anlagen aufgrund des entstehenden, feuchteren Mikroklimas und der verringerten Evapotranspiration erhöht wird (Kellner, 2022; Wydra et al. 2022). Durch die steuerbare Verschattung kann somit in Hitze- und Dürreperioden die Oberflächenverdunstung deutlich reduziert werden. Zusätzlich bieten die Aufständungen die Möglichkeit, ein Bewässerungssystem zu installieren, das im Falle von Bewässerung zielgerichteter und effizienter arbeiten kann als herkömmliche Sprinklersysteme. Um bei unzureichendem Wassermanagement mögliche negative Effekte wie etwa Erosion durch herabfallendes Wasser an den Modulkanten zu vermeiden, können technische und landwirtschaftliche (z.B. Bewuchs) Vorkehrungen getroffen werden (Wydra et al. 2022). Da viele dieser Effekte bislang nur teils unzureichend in vergleichbaren Studien untersucht wurden, ist es empfehlenswert, für Demonstrations- und Forschungsanlagen individuelle Konzepte, z.B. durch die Zuhilfenahme von wissenschaftlichen Monitorings, zu erstellen. Im Rahmen des Konzeptes *Agri-PVThue* wurden zwei Monitoring-Ansätze entwickelt. Der erste Ansatz ist ohne zusätzliche Forschungsgelder in einem landwirtschaftlichen Versuchsgut umsetzbar, während der zweite, umfassendere Ansatz ein hohes Maß an wissenschaftlichen Erkenntnissen liefern könnte, jedoch auf zusätzliche finanzielle Förderung angewiesen ist. Eine Übersicht der damit verbundenen Maßnahmen findet sich in Kapitel 10, detaillierte Informationen sind im Anhang dieses Konzepts enthalten.

4.2) Boden und Anlagenbau

Zur bodenschonenden Verankerung der Anlagen sind Ramm- oder Schraubgründungen mit minimaler Versiegelung, wie Spinnanker oder verzinkte Erdschrauben, geeignet. Diese dürfen jedoch nur eingesetzt werden, wenn die Eindringtiefe oberhalb des höchsten Grundwasserstands liegt. In der ungesättigten Bodenzone bestehen keine grundsätzlichen Bedenken, da die Sickerströmung vertikal verläuft und die Abschirmwirkung der Module eine Kontamination durch Zink stark begrenzt. Diese Gründungen sind jedoch nur für bestimmte Anlagentypen umsetzbar.

Besondere Vorsicht ist während der Bauphase geboten, da bevorzugte Wasserwegsamkeiten entlang der Gründungselemente bei Starkregen Schadstoffe aus der Landwirtschaft in den Boden transportieren könnten. Abgesehen davon wird die Infiltration von Wasser, insbesondere in der Landwirtschaft, als positiver Effekt gewertet. Insgesamt werden die Auswirkungen von PV-Anlagen auf Boden und Wasserhaushalt als unerheblich bewertet, sofern defekte Modulteile im Sinne des präventiven Bodenschutzes entfernt werden (AL-agele et al., 2021; Badelt, 2020).

Auswirkungen von Kabelgräben und Maßnahmen zur Bodenschonung

Der Bau von Kabelgräben verändert zwar die Deckschichten des Bodens, allerdings ist zu berücksichtigen, dass das Tiefpflügen, das Humus in tiefere Bodenschichten verlagert, beispielsweise sogar empfohlen wird, um organische Substanz besser zu binden, die Kohlenstoffspeicherung zu erhöhen und Wasser- sowie Nährstoffvorräte für Kulturpflanzen zugänglicher zu machen (Don, 2014). Auch kann die Kabelanbringung direkt unter den Modulen und nicht im Boden erfolgen.

Nach rechtlichen Vorgaben sollten Bodenverdichtungen vermieden werden, indem Bauarbeiten nur bei trockenen Böden durchgeführt werden. Der Einsatz mobiler Kunststofffahrstraßen sowie leichter Maschinen und Fahrzeuge wird empfohlen (Abbildung 4) (Hietel, 2021).

Zur Kompensation möglicher Bodenverdichtungen können lockernde Maßnahmen wie tiefwurzelnende Begrünung angewendet werden, die sich bereits im Weinbau bewährt haben.



Bodenschutzplatte Typ varioMAT 1+ (vormals eMat)

Technische Daten varioMAT 1+

- Material: Polyethylen, hochmolekular
- Maße: 1200 x 2400 x 14,5 mm (inkl. Profil)
- Gewicht: Ca. 36 kg / Platte
- Oberfläche: Einseitig profiliert
- Traglast: ca. 60t (abhängig vom Untergrund)
- Farbe: schwarz-bunt

Abbildung 4 Bodenschutzplatten zur Verwendung gegen Bodenverdichtungen (Rotec,o.J).

4.3) Scoping von Natur und Umwelt

Da es für den Bau einer Agri-PVA einer Baugenehmigung bedarf, werden im Genehmigungsprozess auch Aspekte des Umwelt- und Artenschutzes geprüft. Auch hier ist die 'Besondere Bedeutung Erneuerbarer Energien' (EEG 2023, §2) und die Tatsache, dass es sich um eine auch vorher schon in der zumeist konventionellen Landwirtschaft genutzte Fläche handelt, zu berücksichtigen.

Dies dient der Sicherstellung, dass durch den Bau der Anlage keine Funktionen des Naturhaushaltes und keine geschützten Tierarten beeinträchtigt werden. Als Referenz für die Bewertung von Agri-Photovoltaik-Anlagen sollte eine konventionell bewirtschaftete Fläche in der Region dienen, inklusive der bereits bestehenden Belastungen durch konventionelle Landwirtschaft. Nur unter Berücksichtigung der bereits vorherrschenden Auswirkungen auf Naturhaushalt und geschützte Tierarten können die spezifischen Auswirkungen von Agri-PV im Vergleich zu bestehenden landwirtschaftlichen Praktiken beurteilt werden. Daher sollten nur dieselben Einschränkungen und Schutzmaßnahmen gelten, die auch für konventionell bewirtschaftete Flächen in der Region gelten.

Derzeit werden von Fachplanern Gutachten erstellt, die anschließend mit den zuständigen Behörden (insbesondere der Unteren Naturschutzbehörde und der Wasserbehörde) abgestimmt werden müssen. Die Erfahrungen aus vergangenen Projekten haben gezeigt, dass eine sorgfältige Abwägung zwischen den Interessen des Naturschutzes und der Energiegewinnung notwendig ist, um Projekte erfolgreich umzusetzen. Das BNatSchG bietet einen wichtigen Rahmen, um diese Abwägung transparent und nachvollziehbar zu gestalten. Trotz Allem, ist eine Berücksichtigung der oben gemachten Einschränkungen bei der Beurteilung notwendig: Das EEG 2023 §2 mit den vorrangigen Belangen Erneuerbarer Energien, sowie das BNatSchG mit seinen spezifischen Sonderregelungen für die Landwirtschaft, da es sich um eine landwirtschaftliche Fläche handelt. Es empfiehlt sich somit, vor Beginn des Genehmigungsprozesses mit den o.g. Behörden zu kommunizieren und die genannten Bedingungen zu erläutern, um zu prüfen, ob der Realisierung der Anlage unter Berücksichtigung der speziellen Regelungen umweltrechtliche Aspekte entgegenstehen.

4.4) Fauna und Flora

Die Notwendigkeit, sowohl die Energiewende voranzutreiben als auch den Naturschutz zu gewährleisten, kann zu Konflikten führen, insbesondere wenn streng geschützte oder störungsempfindliche Arten in den betroffenen Gebieten vorkommen. In solchen Fällen müssen sorgfältige Abwägungen getroffen und möglicherweise Kompromisse eingegangen werden. Neben Berücksichtigung in der Bauphase, können bekannte Schutzmaßnahmen aus der konventionellen Landwirtschaft erforderlich werden. Ein gemeinsamer „Scoping-Termin“ mit den zuständigen Umweltbehörden und beauftragten Fachplanern kann eventuelle Risiken im Vorfeld ausschließen oder identifizieren. Es ist davon auszugehen, dass das Vorhaben nicht zwangsläufig zu Beeinträchtigungen führt, sondern sogar positive Effekte für den Umweltschutz haben kann. Unvorhergesehene negative Auswirkungen, sofern durch

wissenschaftliche Untersuchungen belegt, können durch gezielte Maßnahmen und Anpassungen der Planung kompensiert werden. Da die meisten APV-Anlagen voraussichtlich auf Acker- und Grünlandflächen mit intensiver Nutzung errichtet werden, halten sich die Beeinträchtigungen der Tierwelt in kalkulierbaren Grenzen.

Studien haben gezeigt, dass Freiflächen-Photovoltaikanlagen sogar positive Auswirkungen auf die Artenvielfalt haben können. So konnten beispielsweise vermehrt Brutnachweise für gefährdete Vogelarten des Offenlandes erbracht werden. Auch für verhaltensflexible Kulturlandvögel und Lebensraumspezialisten bieten diese Anlagen wertvolle Habitats (Günnewig et al., 2007; Moore-O'Leary et al., 2017, Badelt et al., 2020). Insbesondere für bodenbrütende Arten und Greifvögel wurden höhere Artenzahlen beobachtet (Jarcuska et al., 2024). Eine mögliche Einschränkung von Vogelarten ist damit unabhängig von der APV-Anlage eher auf die auch vorher schon vorhandene, landwirtschaftliche Nutzung zurückzuführen, die nach DIN SPEC aber Ziel der APV ist. Damit sollten die wissenschaftlichen Erkenntnisse berücksichtigt werden, die in einer neuen Meta-Studie zu Biodiversität und Naturhaushalt (Gessert 2023) und einer kürzlichen Studie zu positiven Auswirkungen von APV auf Ökosystemdienstleistungen (Ludzuweit et al. 2025), beide unter Beteiligung von Prof. Dr. Kerstin Wydra von der FH Erfurt, belegt wurden.

Weiter gibt es keinen Nachweis, dass Solaranlagen Vögel durch optische Täuschungen anziehen oder ihr Verhalten signifikant beeinflussen. Weder Reflexionen noch andere Eigenschaften der Anlagen wirken sich nachweislich auf den Vogelzug oder das Jagdverhalten aus (Harrison & Lloyd, 2016; Herden et al., 2009). Der Einsatz von reflexarmen Materialien in der Tragekonstruktionen, wie lackiertem Metall kann die Blendwirkung zusätzlich minimieren. Im Vergleich zu normalem Glas und anderen reflektierenden Oberflächen weisen PV-Module erheblich geringere Reflexions- und Blendungseffekte auf, wodurch Irritationen für Tiere minimiert werden. Starke Blendwirkungen durch Lichtreflexionen und hierdurch bedingte Irritationen z.B. beim Vogelzug sind aufgrund der Lichtstreuung bzw. Lichtabsorptionseigenschaften der Module offenbar ebenfalls von geringer Relevanz (Günnewig, 2007).

Die Naturschutzbehörde sollte diese wissenschaftlichen Erkenntnisse berücksichtigen und ggf. erforderliche Maßnahmen danach ausrichten. Dies ist im Vorfeld bei Planung von APV-Anlagen zu klären.

Bei durchschnittlichen für APV ideale Agrarflächen in Thüringen handelt es sich um großflächige intensiv genutzte Ackerfläche ohne weitere eingelagerte Biotopstrukturen. Die Randbereiche gestalten sich oft durch randbegleitende Feldgehölze, Wirtschaftswege und weiteren angrenzende Ackerflächen. Berührungspunkte mit EU-Vogelschutzgebiet sind nicht selten. Die Ackerflächen stellen für die dort erfassten Vogelarten keine oder nur erheblich beeinträchtigte Bruthabitate dar. Zu erwarten sind somit die typischen Offenlandbrüter (wie Feldlerche, Rebhuhn) sowie Arten, die in den randlichen Gehölzstrukturen brüten. Für verlässliche Ergebnisse sollte jedoch eine artenschutzrechtliche Kartierung abgewartet

werden. Anschließend empfiehlt sich auch hier ein Scopingtermin mit zuständigen Akteur:innen zu naturschutzfachlichen Themen.

Die besonders geschützten Feldhamster kommen in Thüringen und speziell in der Region um Erfurt herum vor. Aufgrund des hohen Schutzstatus der Art kann ein Vorkommen den Genehmigungsprozess erheblich erschweren, da eine Verletzung oder Tötung der Tiere während der Bauphase nicht unmittelbar ausgeschlossen werden kann. Durch Prüfung von bestehenden Fundpunkten des Feldhamsters, einer Feldhamsterfeinkartierung nach Weidling und Stubbe oder mit Hilfe von ausgebildeten Artenspürhunden, können Bauten im Vorfeld durch einen Fachplaner identifiziert werden. Kommt die Art im Eingriffsraum vor, sollte die Thematik im Zuge eines Scoping-Termins mit der zuständigen Unteren Naturschutzbehörde besprochen werden, um abzuwägen, ob dies dem Bau der Anlage entgegensteht und welche Maßnahmen ergriffen werden müssen. Diese Maßnahmen sowie weitere Maßnahmen für eine naturnahe Implementierung von Agri-PV über die Grenzen der gesetzlichen Rahmenbedingungen hinaus sind unten im Anhang *„Naturnahe Gestaltung von Agri-PV-Anlagen: Zusätzliche Maßnahmen zum Schutz von Feldhamster und Vogelwelt“* zusammengefasst und aufgeführt. Sollte ein Feldhamstervorkommen festgestellt werden, sind unabhängig vom Aufbau einer APV auch bei normaler landwirtschaftlicher Bearbeitung artenschutzrechtliche Schritte einzuleiten. Diese Maßnahmen werden seitens der Landwirte durch Ausgleichszahlungen von Bund und Ländern unterstützt und führen somit nicht zwangsläufig zu einem vollständigen Ausfall der bewirtschafteten Fläche.

4.4) Landschaftsbild in der Agrarlandschaft

Bei der Beurteilung des Landschaftsbildes sollten sowohl EEG 2023 §2 als auch die Sonderregelungen für die Landwirtschaft (z.B. bezüglich Anlagen mit Schutzfunktionen für die Kulturen wie Hagelschutznetze bzw. -folien, etc.) berücksichtigt werden. Einfache Maßnahmen wie die Etablierung einer Sichtschutzhecke und die standardgemäße Antireflexbeschichtungen der Module können etwaige Beeinträchtigungen minimieren. Auch wenn die Landschaft gegenüber der 'Besonderen Bedeutung Erneuerbarer Energien' nach EEG 2023 als nachrangiges Schutzgut zu betrachten ist, können eine „Landschaftswirksamkeit“ und „Sichtbeziehungen“ einer Anlage mit ihren individuellen Komponenten und deren Höhen durch Pflanzungen von Heckenstrukturen unterbunden und ein Schutz der Landschaft gewährleistet werden.

Aufgrund des technischen Charakters und der flächenhaften Ausdehnung der APV-Anlagen, kann das Landschaftsbild beeinträchtigt werden. Die Untere Naturschutzbehörde kann, unter Abwägung der obigen Ausführungen und wissenschaftlicher Erkenntnisse, bestimmen, ob und wenn ja, wo ausgleichende Pflanzungen notwendig sind. Andererseits können APV-Anlagen positive Strukturelemente in einer sonst unstrukturierten Landschaft mit sehr großen Schlägen darstellen. Empfohlene Pflanzmaßnahmen sollten sorgsam kalkuliert werden, da die Kosten sich je nach Anzahl der Reihen, ausgewählten Pflanzen und aufgelegter Pflege pro 100

m auf 800 - 5.000 EUR belaufen können. Geoinformationssystem-gestützte Sichtbarkeitsanalysen können aufzeigen, inwiefern bereits bestehende Strukturen in der Landschaft die Anlage abschirmen, und helfen, potenziell beeinträchtigende Sichtachsen im Vorfeld zu identifizieren.

APV-Solarparks können, abhängig von ihrem Standort und ihrer Gestaltung, in der von Stromleitungen und Straßen geprägten Landschaften, durch naturnahe Elemente wie Hecken und Blühstreifen nicht nur das Landschaftsbild aufwerten, sondern auch positive ökologische Effekte fördern. Strukturierende Elemente wie randliche Begrünungen mit standortheimischen Gehölzen, größere ungestörte Freiflächen zwischen den Teilflächen der Anlage (Querungskorridore) sind Maßnahmen, die eine Integration in das Landschaftsbild und eine optische Einbindung in die Umgebung bieten (Cypher et al., 2021; Herden et al., 2009). Durchlässige Zäune mit mindestens 20 cm Bodenabstand tragen weiterhin dazu bei, ein ökologisches Netzwerk zu erhalten und die Ausbreitung von Arten zu ermöglichen. Diese Maßnahmen können die optische Wirkung reduzieren und das Landschaftsbild in ausgeräumten Agrarlandschaften sogar bereichern. Entsprechende positive Maßnahmen wurden bereits vom Landesjagdverband Schleswig-Holstein e.V. (Zabel, 2022) und Gessert (2023) für Freiflächenanlagen beschrieben und können teils in APV-Anlagen Verwendung finden.

Die Errichtung von Solarparks unterliegt in Landschaftsschutzgebieten und Biosphärenreservaten oft Bauverböten mit Erlaubnisvorbehalt. Die Bestimmungen des EEG 2023 §2 müssen allerdings berücksichtigt werden. Maßnahmen wie eine geschlossene Umpflanzung (Abbildung 5), die Anpassung von Technikgebäuden (z. B. durch Holzverschalung oder Eingrünung) und die Auswahl visuell vorbelasteter Gebiete können die Integration erleichtern. APV-Anlagen auf landwirtschaftlich weiterhin bewirtschafteten Flächen können, wie oben beschrieben, für das Landschaftsbild strukturgebende, positive Auswirkungen haben.



Abbildung 5 Beispiel für die standortangepasste Gestaltung durch Umpflanzung mit strauchigen Strukturen einer PV-FFA bzw. APV mit Heckenpflanzungen (Hietel et al., 2021) Fotos: Lenz, C., 2020. Pfeil zeigt auf PV-FFA.

5) Konzepterstellung Anlagentechnik

Diese Konzeptstudie identifiziert hoch aufgeständerte Agri-PV-Anlagen mit 1 P Trackern als die optimale Lösung für den Ackerbau in Thüringen, da sie die effizienteste Synergie zwischen landwirtschaftlicher Nutzung und erneuerbarer Energieerzeugung bieten sowie den besten Pflanzenschutz gewährleisten. Diese Wahl ist insbesondere auf die Anforderungen der landwirtschaftlichen Traktoren und Geräte mit großen Durchfahrtsbreiten und hohen Überkopfhöhen zurückzuführen. Eine detailliertere Analyse dieser Aspekte erfolgt in dem folgenden Kapitel.

Alternativ kämen noch niedrigaufgeständerte Tracking-Systeme mit Modulunterkanten über 0,80 m infrage. Diese bieten jedoch im Vergleich zu hoch aufgeständerten Systemen nicht das gleiche Maß an Synergien bezüglich des Schutzes der darunterliegenden pflanzlichen Kulturen. Da niedrigaufgeständerte Systeme jedoch für bestimmte Anwendungen, wie etwa den Einsatz auf Hanglagen bzw. unebenen Feldern oder Kulturen, in denen eine Schutzwirkung wenig Bedeutung hat, geeignet sein können, werden sie im weiteren Verlauf näher erläutert.

Neben den konventionellen, bodennahen Modulen stellen vertikale Agri-PV-Systeme mit bifazialen Modulen, die vertikal zwischen den Anbaureihen angeordnet sind, ebenfalls eine Alternative dar. Aufgrund des fehlenden Schutzes für die darunterliegenden Kulturen, einer im Vergleich geringeren Energieproduktion pro Hektar und begrenzter Synergien mit der landwirtschaftlichen Nutzung – wie in Kapitel 2 dargelegt – wurden diese Systeme für das Projekt *Agri-PVThue* jedoch nicht weiter in Betracht gezogen.

Niedrigaufgeständerte Tracking-Systeme:

Tracking-Anlagen ermöglichen eine zeitgenaue Regulierung des Lichteinfalls. Das Untergestell der Module ist beweglich und kann entweder einachsrig (horizontal oder vertikal) oder zweiachsrig (horizontal und vertikal) dem Sonnenstand folgen oder Schutz für die Pflanzen vor Wetterextremen und zu starker Einstrahlung gewährleisten. Weiterhin kann bei Bedarf die volle Sonneneinstrahlung für die Pflanzen ermöglicht werden. Dadurch wird ein optimales Lichtmanagement erreicht. Die verstellbaren Modultische können verschiedene Mindesthöhen haben und werden in Kategorie I und II eingeteilt (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). In diesem Fall wird hier eine Anlage der Kategorie II mit einer Modulkantenhöhe von > 81 cm diskutiert. Eine Höhe von > 80 cm bei voller Neigung der PV-Module ist für die Zertifizierung und Förderung von ausschlaggebender Bedeutung. Auch hier sollten die Pfeilerabstände den Breiten der Maschinen angepasst werden. Zwischen den beiden Kategorien gibt es keine Unterschiede in den Pfeilerabständen, da die technischen Anlagen bei der Bewirtschaftung und Ernte vertikal gestellt werden können, wodurch der Pfeilerabstand als maximale Maschinenbreite angenommen wird. Die Aufstellung ist selbst auf landwirtschaftlichen Flächen mit steiler Hangneigung möglich (Axial Structural, 2024). Durch die Nachführung können die Stromerträge um 15% bis 30% gesteigert werden (Singh et al., 2020).

Die Flexibilität dieses Agri-PV-Systemes ermöglicht eine Anpassung an die spezifischen Anforderungen des Stromnetzes und der Pflanzen. Durch eine suboptimale Ausrichtung der Module zur Sonne (Mittagsspitzenkappung) kann die Einspeisung reduziert werden. Darüber hinaus kann der Tracking-Algorithmus so angepasst werden (sogenanntes 'Anti-Tracking', vgl. Kapitel 6), dass die Module morgens und abends für ein höheres PAR-Level (PAR = photosynthetically Active Radiation, von Pflanzen nutzbares Licht) sorgen (Hörnle, 2022). Der Schutz der Pflanzen vor Umwelteinflüssen ist bei bodennahen Tracking Anlagen genauso wie bei hoch aufgeständerten Anlagen von Bedeutung. Die Nachführung erleichtert die Bewirtschaftung, reguliert den Stromertrag, erhöht die PAR, schützt allerdings nur bedingt vor extremen Wetterereignissen, da große Abstände zwischen den Modulreihen offenbleiben (Vandest & Hemetsberger, 2021) (Abbildung 6).

Ein Nachteil der nachgeführten Anlagen ist der entstehende starke Kernschatten unter den beweglichen Modulen, der den Anbau von Kulturen erschwert, sofern kein Anti-Tracking eingesetzt wird. Der potenzielle Flächenverlust wird auf maximal 15 % geschätzt (Deutsches Institut für Normung e.V. 2021). Zusätzlich ergeben sich Herausforderungen durch den technischen Aufwand, da die beweglichen Teile anfällig für Verschleiß und Störungen sein können. Dies kann zu höheren Investitions- sowie Wartungs- und Betriebskosten führen (Cengiz et al., 2016).



Abbildung 6 Doppelernte und Schletter im bayrischen Althegnenberg ein zwei Hektar großen Acker mit 750 Kilowatt Agri-Photovoltaik-Anlage, Bild: Doppelernte & Schletter

Hoch aufgeständerte Systeme:

Die Kategorie I der DIN SPEC 91434:2021-05 bezieht sich auf hoch aufgeständerte APV-Anlagen. Der Begriff „hoch aufgeständert“ beschreibt dabei eine lichte Höhe (Systemhöhe, siehe Abbildung 3) von mehr als 2,1 m. Um eine weitgehend gleichbleibende landwirtschaftliche Bewirtschaftung im Vergleich zur Zeit vor dem Bau der Anlage zu ermöglichen, wird empfohlen, die Höhe der Anlagen an die verwendeten landwirtschaftlichen

Maschinen anzupassen. In Deutschland liegt die durchschnittliche Höhe der meisten herkömmlichen Traktoren bei ca. 4 m, was auf § 32 Abs. 2 StVZO zurückzuführen ist, der eine maximale Fahrzeughöhe von 4 m auf öffentlichen Straßen vorschreibt. Eine hoch aufgeständerte APV-Anlage im Ackerbau sollte so mindestens 5 m hoch sein. Ein zentraler Vorteil hoch aufgeständerter APV-Anlagen liegt im Schutz der darunter angebauten Kulturen vor extremen Wetterereignissen wie Hagel, Starkregen oder intensiver Sonneneinstrahlung (Badelt, 2020).

Das in dieser Konzeptstudie vorgestellte Szenario basiert auf den technischen Spezifikationen des Projekts APV RESOLA in Heggelbach (Abbildung 7), wobei insbesondere bifaziale Glas-Glas-Module und ein Modulreihenabstand von 9,5 m bei einer Modulreihenbreite von 3,4 m zur Anwendung kommen. Das System in Heggelbach erreichte eine Landnutzungsrate von etwa 160 % (Fraunhofer ISE, PV-Fakten, 2024), und einen Flächenverlust von unter 10 % (DIN, 2021) (Abbildung 2). Im Unterschied zum RESOLA-Projekt wird im *Agri-PVThue* Konzept ein einachsiger nachgeführtes Trackingsystem angenommen, bei dem ein Stützpfilerabstand von ca. 30 m vorgesehen ist. Auch soll durch die Entwicklung eines neuen Aufständerkonzeptes auf die Verwendung großer Mengen von Stahl verzichtet werden. Die Kombination aus Tracking und hoher Aufständerkung bietet Synergieeffekte für Energieertrag und landwirtschaftliche Nutzung, indem durch Antitracking die Verschattung minimiert und in kritischen Wachstumsphasen eine optimale Lichtzufuhr sichergestellt werden kann.

Abbildung 7 zeigt die APV-Testanlage in Heggelbach, eine typische APV-Anlage der Kategorie I gemäß DIN SPEC 91434 (APV RESOLA, 2024). Die ursprüngliche Aufständerkung dieser Anlage war sehr massiv, und die Verwendung großer Mengen von Stahl führte zu ungünstigen Werten in einer Life Cycle Analyse (Busch und Wydra 2023); die Forschungsergebnisse legen jedoch nahe, dass hoch aufgeständerte Systeme auch in Leichtbauweise effizient und kostengünstiger realisiert werden könnten, was zu geringeren Bodenbelastungen führen würde.

Ein aktueller Trend ist der Einsatz semitransparenter Module, die ausreichende PAR für das Pflanzenwachstum gewährleisten (Gorjian et al., 2022). Dies ermöglicht eine dichtere Anordnung der Modulreihen und eine höhere Ground Cover Ratio (GCR) sowie einen höheren Landnutzungsfaktor (LER) (Fraunhofer ISE, 2022; Scharf et al., 2021). Allerdings erfordert eine größere Aufständerkungshöhe aufgrund der höheren Windlasten mehr Material, was die Investitionskosten gegenüber bodennahen Anlagen steigert.

Aufgrund der höheren Investitionskosten und der im Vergleich geringeren Energieproduktion semitransparenter Module wird in diesem Konzept der Einsatz umweltfreundlicherer, bifazialer Glas-Glas-Module empfohlen. Diese Module sind mit ca. 250 €/kWp etwa halb so teuer wie herkömmliche semitransparente Module, die etwa 500 €/kWp kosten (Wydra et al., 2022), und kommen durch die Glas-Glas Versiegelung ohne ggf. umweltbelastende Schutzstoffe aus. Hersteller wie WINAICO haben Erklärungen abgegeben, die eine vollständige

Abkehr von PFAS ankündigen, um die Umweltbilanz und Recyclingfähigkeit der PV-Module zu verbessern (Klatt, 2022).



Abbildung 7 Hochaufgeständerte Agri-PV Anlage Hofgemeinschaft Heggelbach. Module in etwa 5 m Höhe. Bild: Hofgemeinschaft Heggelbach

Die untenstehende Tabelle 1 zeigt Argumente sowohl für hoch aufgeständerte (HAPV) als auch niedrigaufgeständerte APV-Systeme (NAPV), wobei HAPV die stärksten Vorteile für die landwirtschaftliche Nutzung bieten. Da in unserem Konzept primär landwirtschaftliche Interessen verfolgt werden, wird HAPV bevorzugt. Insbesondere eine Kombination aus Tracking-Technologie und hoch aufgeständerten APV-Anlagen könnte sowohl für die landwirtschaftliche Nutzung als auch für die Energieproduktion erhebliche Vorteile bringen, obwohl die Kosten eine Herausforderung darstellen könnten.

In einem Gespräch mit einem anonymen Anbieter wurde nach der Realisierbarkeit einer solchen Anlage gefragt. Nach Rücksprache mit dem technischen Team bestätigte der Anbieter, dass hoch aufgeständerte APV-Anlagen mit einachsigen Tracking unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten rentabel sein können, jedoch eine Fläche von mindestens 20 Hektar erfordern.

Tabelle 1 bietet einen Überblick über potenzielle Kosten sowie die Eignung verschiedener Systemtypen für den Einsatz in Thüringen. Dabei ist zu beachten, dass die angegebenen Werte zur Energiedichte auf standard-bifazialen Modulen basieren und sich je nach verwendeter Modulart erheblich ändern können. Ebenso beeinflussen die Abstände zwischen den Modulen die Energiedichte sowie die Lichtverfügbarkeit für die Pflanzen maßgeblich. Die Kosten pro

kWp hängen stark von der Bauweise und den verwendeten Materialien ab. In diesem Fall wird von Traggestellen aus Stahlkonstruktionen ausgegangen.

Die Bewertung der verschiedenen Systeme hinsichtlich ihrer Synergien und Eigenschaften (z.B. landwirtschaftliche Bewirtschaftung, Schutz der Pflanzen vor Umwelteinflüssen) basiert auf der im Rahmen dieser Konzeptstudie gesichteten Literatur. Die Einschätzungen spiegeln die zusammengefassten Erkenntnisse wider, die im Verlauf der Erstellung des Konzepts erarbeitet wurden.

Tabelle 1 Vergleich der Agri-PV System Arten hinsichtlich Investitionskosten und Einfluss auf landwirtschaftliche Faktoren – Bewertung nach Schulnoten: 1 – sehr gut, 2 – gut, 3 – befriedigend, 4 – ausreichend, 5 – mangelhaft

System-Art	Energie-dichte in kWp / ha *	Kosten pro kWp in €/kWp *	Landw. Bewirt-schaftung	Schutz der Pflanzen vor Umwelt-einflüssen	Lichteinfall*	Wasser-Management **	Flächen-verlust
Hoch aufgeständert	600 ¹	650 ⁴	Sehr gut	Sehr gut	Befriedigend	Befriedigend	10 %
Niedrig aufgeständert Tracking, Breite 7 m	875 ¹	800 ⁴	Befriedigend	Ausreichend	Mangelhaft	Gut	15 %
Hoch aufgeständert, Tracking	690-780 ²	1200 ⁵	Sehr gut	Sehr gut	Sehr gut	Gut	10 %
Vertikal	395 ³	450	Gut	Mangelhaft	Befriedigend	Ausreichend	15%
1 Fraunhofer ISE. (2022), 2 Eigene Rechnung basierend auf Fraunhofer ISE. (2022) erwarteter Ertragssteigerung durch Tracking von 15 - 30 %, 3 Badelt et al. (2020), 4 Wydra et al. (2022), 5 Enerparc AG *Abhängig Von Modul-Art Vgl. Wydra et al. 2022 Werte beruhen auf Kosten pro kWp für bifaziale-Module von 250 €/kWp ** Wasserspeichermöglichkeit und verringerte Evapotranspiration							

Bezüglich der möglichen Verschmutzung von Modulen durch landwirtschaftliche Einflüsse, wie etwa Ernte- oder Blütenstaub, liegen derzeit keine umfassenden Forschungsergebnisse vor. Ob eine regelmäßige Reinigung der Module erforderlich ist und in welchem Turnus sie sinnvoll durchgeführt werden sollte, hängt stark vom Standort und den dortigen Niederschlagsmengen ab. Häufigere Starkregen in unseren Breiten sollten eine ausreichende Reinigung gewährleisten. Einigen Nutzern wird, nach Bedarf, zur Sicherstellung der Leistungsfähigkeit der Anlage empfohlen, die Module mindestens einmal jährlich zu reinigen. Der Einsatz von Hochdruckreinigern, insbesondere mit Druckwerten über 0,5 bar, sollte vermieden werden, da diese bereits bei moderaten Druckwerten Schäden oder Kratzer auf der Moduloberfläche verursachen können (Kärcher GmbH, 2024). Für Glas-Glas-Module würde dies nicht zutreffen.

Für eine ggf. notwendige Reinigung eignen sich alternative Methoden, wie z.B. Walzenbürsten mit weichen Borsten oder die Beauftragung spezialisierter Dienstleistungsunternehmen. Hierbei sollte ausschließlich Wasser verwendet werden, um eine mögliche Kontamination der landwirtschaftlichen Flächen durch Reinigungsmittel zu vermeiden. Die Kosten für die Reinigung werden abhängig vom Geschäftsmodell entweder vom Anlagenhersteller, dem Betreiber oder einem externen Dienstleister übernommen (siehe Kapitel 9 & 10).

Anwendungsbeispiel in Thüringen:

Wie schon erwähnt, identifiziert diese Konzept-Studie hoch aufgeständerte APV-Anlagen als die optimale Lösung für Thüringen, da diese die größte Synergie zwischen landwirtschaftlicher Produktion und erneuerbarer Energieerzeugung bei maximalem Pflanzenschutz ermöglichen. Um die Anwendbarkeit dieser Technologie zu verdeutlichen, wird im Folgenden ein konkretes Anlagenkonzept für einen durchschnittlichen Standort in Thüringen vorgestellt.

Unter Berücksichtigung der Vorgaben der DIN-Norm sowie der Förderbestimmungen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) wurden die folgenden Anlagenspezifikationen festgelegt:

- **Überkopfhöhe:** 5 m, unterstützt durch Metallkonstruktionen als Stützpfeiler. Diese Höhe gewährleistet eine ungehinderte landwirtschaftliche Bewirtschaftung mit großem Maschinenpark, wie er in der Region für den Ackerbau typisch ist.
- **Durchfahrtsbreite:** 12-30 m, im Hallenbau bereits realisiert durch Stahlfachwerk oder vorgespannte Holzfachwerkträger. Dies ermöglicht einen effizienten Betrieb und den Einsatz gängiger Agrarmaschinen.
- **Fundament:** Rückbaubare Fundamente wie Spinnanker, Stahlstützen, die in das Erdreich gerammt werden oder andere bodenschonende rückbaubare Lösungen. Diese Technik stellt sicher, dass der Boden nach der Demontage der Anlage in seinem ursprünglichen Zustand wiederhergestellt werden kann, was besonders im Hinblick auf die langfristige landwirtschaftliche Nutzung wichtig ist und den Vorgaben der DIN Norm entspricht.
- **Modultyp:** Bifaziale Glas-Glas Solarmodule. Diese Module bieten im Vergleich zu monofazialen Modulen einen bis zu 25 % höheren Energieertrag, da sie sowohl das direkt auf die Vorderseite treffende Licht als auch das reflektierte Licht von der Rückseite nutzen.
- **Modulreihenabstand:** 3 bis 5 m, abhängig von der spezifischen Bauart der Anlage. Dieser Abstand ist vergleichbar mit der Testanlage des Projekts APV-RESOLA in Heggelbach und bietet eine optimale Balance zwischen Energieproduktion und landwirtschaftlicher Nutzung.
- **Modulstellung:** Einachsiges Tracking in Ost-West-Richtung. Durch das Tracking-System, welches die Module dem Sonnenstand nachführt, kann der Energieertrag um bis zu 30 % gesteigert werden, was die Effizienz der Anlage erheblich erhöht. Je nach Bedarf der Kulturpflanze, kann das Tracking optimal für die Pflanzen eingestellt werden.

- **Verschattungsgrad:** 30 % bis 40 %, abhängig vom Reihenabstand der Module. Diese Verschattung ist ausreichend gering, um die landwirtschaftliche Produktion nicht wesentlich zu beeinträchtigen, während sie dennoch Schutz vor übermäßiger Sonneneinstrahlung und Wasserverlust durch Verdunstung bietet.
- **Geeignete Kulturen:** Kartoffeln, Winterweizen, Roggen, Gerste, Hafer und Ackergras. Studien zeigen, dass unter einem Verschattungsgrad von 30 bis 40 % entweder eine Ertragssteigerung oder eine Ertragsminderung von weniger als 30 % bei diesen Kulturen zu erwarten ist, je nach Wetterbedingungen (siehe Kapitel 7 & 8).
- **Biodiversitätsmaßnahmen:** Blühstreifen, die um die Stützpfeiler der Agri-PV-Anlage angelegt und durch schonende Mahd oder Beweidung gepflegt werden, fördern die Biodiversität und tragen maßgeblich zur ökologischen Nachhaltigkeit der Anlage bei, indem sie Lebensraum für Insekten und andere Tierarten bieten. Die Verwendung mehrjähriger Saatgutmischungen sowie die Etablierung langfristiger Pflegekonzepte können die Biodiversität zusätzlich signifikant steigern (*Mehrfährige Blühstreifen - NABU BW, 2024*). Dieser Ansatz trägt auch zur Erosionsprävention bei, vermindert den Humusabbau und reduziert den Schädlingsdruck auf natürliche Weise. Voraussetzung für positive Effekte auf Nützlinge ist jedoch der Verzicht auf den Einsatz von Pestiziden, um die in den Blühstreifen angesiedelten Nützlinge nicht zu gefährden (ebd.).
- **Wassermanagement:** Installation von Beregnungs- oder Regenrinnen zur Speicherung und/oder gezielten Verteilung von Wasser, sowie Ablauf- und Verteilungsspalten zwischen den Modulen. Diese Maßnahme verhindert Erosion durch herabströmendes Wasser aus 5 m Höhe, indem das Wasser verteilt wird, bevor es den Boden erreicht. Zusätzlicher Bewuchs, wie Blühstreifen, kann die Erosion reduzieren. Insbesondere die Anbringung direkt an den Stützpfeilern kann, die durch ablaufendes Wasser verursachte Erosion, zusätzlich verringern.
- **Netzanschluss:** Der Netzanschluss sollte sich im Umkreis von 6 km befinden. Eine Anlage mit einer Leistung von 50 MWp kann wirtschaftlich betrieben werden, wenn der Netzanschlusspunkt in diesem Radius liegt, was die Rentabilität der Energieerzeugung sicherstellt.

6) Agrartechnik (landwirtschaftliche Geräte & Maschinen, Pflanzenschutz)

Wie in der DIN SPEC beschrieben, sollte die Dimensionierung von Agri-Photovoltaik-Anlagen (APV) so gestaltet werden, dass eine Bewirtschaftung mit gängigen landwirtschaftlichen Maschinen weiterhin möglich ist.

Die meisten APV-Systeme verfügen über Durchfahrtsbreiten von weniger als 15 m, in der Regel nur 8 bis 12 m, was für den Ackerbau problematisch sein kann, weil geeignete Bewirtschaftungsgeräte zur Verfügung stehen müssen. Diese Durchfahrtsbreiten erfordern daher die Anpassung des Maschinenparks oder der Bewirtschaftungsstrategien, was die Synergie zugunsten der Landwirtschaft verringert und zu größeren Flächenverlusten aufgrund der Stützpfeiler führen kann.

Die Planung einer hoch aufgeständerten Agri-Photovoltaik-Anlage (APV) mit Durchfahrtsbreiten von bis zu 30 m und einer Überkopfhöhe von mindestens 5 m besitzt eine besondere Relevanz zur Verbesserung der Synergien zwischen landwirtschaftlicher Nutzung und Energieerzeugung. Solche Anlagen bieten im Vergleich zu niedrigeren Konstruktionen eine höhere Moduldichte und damit eine relativ gesteigerte Energieproduktion. Hoch aufgeständerte Systeme schützen zudem die darunter liegenden Kulturen effektiver und ermöglichen in Kombination mit (Anti-) Tracking-Systemen die Maximierung des Energieertrags ohne zusätzliche Lichtverluste für die Pflanzen unter den Modulen – ein Vorteil gegenüber vielen, niedrig aufgeständerten APV-Systemen. Diese hohen Systeme beeinflussen außerdem die mikroklimatischen Bedingungen unter den Modulen positiv. Es ist allerdings zu berücksichtigen, dass derzeit hoch aufgestellte Anlagen noch höhere Kosten verursachen als bodennahe Anlagen. Ein ressourcensparendes Design soll in unseren Planungen getestet werden.

Niedrig aufgeständerte Systeme stehen häufig vor der Herausforderung, eine Balance zwischen einer ausreichenden Moduldichte für wirtschaftlichen Energieertrag und der Bereitstellung ausreichend breiter Durchfahrten für landwirtschaftliche Maschinen zu finden. Diese Anforderungen können zu Lasten der landwirtschaftlichen Bewirtschaftbarkeit gehen, sind aber für manche Ackerkulturen sowie Grünland möglich. Die hohe Bedeutung des hier untersuchten Konzepts liegt daher auch in der Eignung der geplanten hoch aufgeständerten APV-Anlage, die gewohnte Fruchtfolge weiter zu verwenden, die Durchfahrtsbreiten zu optimieren und zugleich den Ertrag des Energiesystems zu maximieren.

Zudem sind die hohen Kosten für die Anpassung landwirtschaftlicher Maschinen an geringere Durchfahrtsbreiten ein bedeutender Faktor, der für größere Abstände wie hier vorgesehen spricht. Mit Durchfahrtsbreiten unter 30 m steigt die Komplexität der Feldbewirtschaftung, da sie häufig mehr Wendemanöver und Fahrtrichtungswechsel erfordert, was nicht nur den Kraftstoffverbrauch erhöht, sondern auch die Effizienz der landwirtschaftlichen Arbeit insbesondere während der Erntezeit beeinträchtigt.

Dies ist insbesondere für den Getreideanbau relevant, da hier häufig großformatige Maschinen mit Spannweiten von über 30 m eingesetzt werden. Für die Wirtschaftlichkeit des Getreideanbaus in Thüringen sind insbesondere große, zusammenhängende Flächen von Bedeutung, da sie eine effizientere Bearbeitung ermöglichen, wodurch die Anzahl der Durchfahrten reduziert und Kosten sowie Zeit eingespart werden können. Nicht alle der im Einsatz befindlichen Maschinen erreichen diese maximalen Spannweiten. Ein Beispiel für eine solche breite Maschine ist die Pflanzenschutzspritze, die eine Spannweite von bis zu 34 m aufweist und für Pflanzenschutzmaßnahmen sowie die Düngung verwendet wird (Demmel & Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, 2022). Es ist daher entscheidend, dass beim Design der APV-Anlage der Abstand zwischen den Stützpfeilern so gewählt wird, dass die Durchfahrt mit solchen oder vergleichbaren Maschinen problemlos möglich bleibt. Ein größerer Abstand zwischen den Pfeilerreihen minimiert zudem den Flächenverlust, der durch Abstandsregeln bedingt wäre, und trägt somit zur Erhaltung eines hohen Flächennutzungskoeffizienten bei.

Basierend auf dem genannten Beispiel sollten die Spannweiten zwischen den Stützpfeilern in Fahrtrichtung so gewählt werden, dass auf beiden Seiten der Maschinen ein Sicherheitsabstand von 0,5-1,0 m zu den Pfeilern eingehalten wird. Für eine Spritze mit einer Breite von 34 m (Demmel & Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising, 2022) würde dies eine Spannweite von 35 bis 36 m erfordern.

Derzeit sind uns keine Systeme bekannt, die solche großen Spannweiten wirtschaftlich überbrücken können. Allerdings ist die Realisierung solcher und noch größerer Spannweiten technisch machbar und wird bereits bei Hallenkonstruktionen für die Lagerung von Erntegut und ähnlichen Anwendungen umgesetzt (Agrotel Gitterträgerhallen, 2024). Diese Konstruktionen verwenden bodenschonende Spinnanker, um Spannweiten von über 30 m zu realisieren, was auch den Anforderungen der DIN SPEC 91434:2021-05 entspricht.

Auch die Höhe der Aufständering wird maßgeblich durch die landwirtschaftlichen Maschinen, wie beispielsweise Traktoren, bestimmt. Die meisten herkömmlichen Traktoren haben eine Höhe zwischen 2,5 und 4 m, was auf § 32 Abs. 2 StVZO zurückzuführen ist, der eine maximale Fahrzeughöhe von 4 m auf öffentlichen Straßen vorschreibt. Um ausreichend Abstand zwischen den Modulen beziehungsweise dem Gestell und den Maschinen zu gewährleisten, sollte die Aufständering eine lichte Höhe von mindestens 5 m, vorzugsweise 5,5 bis 6 m, aufweisen.

Solange die in diesem Konzept, sowie in der DIN SPEC 91434 beschriebenen Anforderungen bei der Planung der Anlage berücksichtigt werden, sollte die Aufständering keine Probleme für den Einsatz weiterer landwirtschaftlicher Maschinen darstellen. Eines der Ziele dieser Planung ist es, die Nutzung konventioneller Geräte und Maschinen zu ermöglichen, was die Akzeptanz der Landwirt:innen erhöhen und die mit der Doppelnutzung des Ackers verbundenen Kosten, insbesondere für die Landwirt:innen, senken sollte.

Aktuell sind Systeme mit solchen Spannweiten mit Spannseilen realisiert, jedoch immer noch in der Pilotphase. Hier sind Langzeitstudien von mehreren Jahren von Nöten, um Materialverhalten und Verschleiß im System zu prüfen, sowie das Tragverhalten, um gegenüber Wetterextremen wie z.B. Stürmen nachweislich standhalten zu können.

Daher wurde in diesem Konzept ein neues System einer europäischen Firma herangezogen, um mit einer relativ hohen Spannweite von 14 m die Wirtschaftlichkeit eines solchen Überkopf Systems nachzuweisen (siehe Kapitel 10).

7) Fruchtfolge

Die Festlegung einer geeigneten Fruchtfolge ist von entscheidender Bedeutung für den Erhalt der Bodenfruchtbarkeit sowie für die Sicherstellung stabiler Erträge. Durch die Rotation mehrerer Kulturen auf demselben Feld wird zudem der Krankheitsdruck verringert, und der Ertrag kann im Vergleich zu Monokulturen um 5 bis 20 % gesteigert werden (Bullock, 1992).

Im Kontext von Agri-Photovoltaik (Agri-PV) muss zusätzlich die Schattentoleranz der für die Fruchtfolge ausgewählten Kulturen berücksichtigt werden. Wie in Kapitel 7 und in der folgenden Darstellung erläutert, unterscheiden sich die im thüringischen Ackerbau verbreiteten Kulturen erheblich in ihrer Eignung für den Anbau unter Verschattungsbedingungen. Werden Kulturen ausgewählt, die nicht schattentolerant sind, können erhebliche Ertragsverluste auftreten.

Die in der Literatur angegebenen Ertragsverluste bei Verschattung variieren zwischen den Studien teils deutlich. Dennoch lassen sich generelle Trends erkennen, die in Abbildung 10 und Tabelle 2 zusammengefasst sind.

Tabelle 2 Vergleich möglicher Thüringer Ackerkulturen (in Fruchtfolgerotation des TLPVG) hinsichtlich ihrer Eignung für Agri-PV basierend auf der Schattentoleranz

Kultur im Anbau des TLPVG	Abkürzung	Eignung	Quelle
Winterweizen	WW	<i>geeignet</i>	(Pataczek et al., 2023), (Dupraz, 2023; Garrod et al., 2024; Yeligeti et al., 2023), Wydra et al. 2022)
Wintergerste	WG	<i>geeignet</i>	(Yeligeti et al. 2023, Garrod et al. 2024)
Sommergerste	SG	<i>geeignet</i>	(Arenas-Corraliza et al., 2019; Wydra et al., 2022; Yeligeti et al., 2023)
Hafer		<i>geeignet</i>	(Garrod et al. 2024)
Luzerne		<i>geeignet</i>	(Edouard et al., 2023; Liatukienė et al., 2024; Towner et al., 2022; Varella et al., 2011)
Acker / Gemenge Futter	GF	<i>geeignet</i>	(Laub et al., 2021; Pang et al., 2019; Towner et al., 2022)
Roggen	RO	<i>geeignet</i>	(Yeligeti et al. 2023, Wydra et al. 2022)
Dinkel bis 2021		<i>geeignet</i>	(Garrod et al. 2024)
Kartoffeln	KA	<i>geeignet</i>	(Garrod et al. 2024, Wydra et al. 2022, Laub et al. 2022)
Winterraps	Raps	<i>Bedingt geeignet</i>	(Yeligeti et al. 2023, Garrod et al. 2024, Wydra et al. 2022)
Sojabohne	Soja	<i>Bedingt geeignet</i>	(Yeligeti et al. 2023, Garrod et al. 2024)
Zuckerrübe		<i>Bedingt geeignet</i>	(Yeligeti et al. 2023, Garrod et al. 2024, Wydra et al. 2022)

Ackerbohne	AB	<i>Bedingt geeignet</i>	(Garrod et al., 2024; Nasrollahzadeh et al., 2007; Wydra et al., 2022)
Mais		<i>Bedingt geeignet</i>	(Yeligeti et al. 2023, Dupraz 2023, Garrod et al. 2024, Wydra et al. 2022)
Weißer Lupine	Lup	<i>Eher nicht geeignet</i>	(Mantino et al., 2021; Yeligeti et al., 2023)
Sonnenblume	SBI	<i>Eher nicht geeignet</i>	(Lindström et al., 2006; Wydra et al., 2022; Yeligeti et al., 2023)
Erbse		<i>Eher nicht geeignet</i>	(Akhter et al., 2009; Blanchet et al., 2022; Wydra et al., 2022; Yeligeti et al., 2023)
Öllein		<i>Eher nicht geeignet</i>	(Bazzaz & Harper, 1977; Wydra et al., 2022; Yanagisawa & Yanagisawa, 1964)

Mit dem *Agri-PVThue* Projekt soll die Basis für eine Demonstrationsanlage geschaffen werden, die sowohl wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse als auch praxisrelevante Informationen zur Bewirtschaftung von Agrarflächen unter einer Agri-PV-Anlage (Kategorie I) in der mitteldeutschen Trockenregion Thüringens liefert. Im Fokus stehen die Auswirkungen von Schattenwurf und verändertem Wasserhaushalt (positiv bei Trockenheit) auf den Anbau etablierter Kulturpflanzen. Das Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR), Referat 36 (TLPVG), soll die konventionelle Bewirtschaftung unter Einbeziehung der verfügbaren Flächen, Maschinen- und Personalkapazitäten durchführen.

Eine Auswahl gängiger Ackerkulturen soll unter einer Agri-PV-Anlage und auf einer Referenzfläche getestet werden. Die Schattentoleranz der Kulturen wurde anhand von wissenschaftlicher Literatur in Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Erfurt evaluiert, um die Versuchspflanzen gezielt auszuwählen (siehe unten). Für schattenempfindliche Kulturen sind maximal 1–3 Anbauversuche vorgesehen, wobei Anti-Tracking-Systeme die Photosynthetisch Aktive Strahlung (PAR) während kritischer Wachstumsphasen optimieren können. Ziel ist es, die Potenziale und Grenzen von Agri-PV in der Region genauer zu bestimmen.

Ertragsveränderungen werden transparent dokumentiert, in die Gesamtauswertung einbezogen und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Ein Vergleich mit internationalen Studien soll die Aussagekraft der Ergebnisse erhöhen, um die Anwendbarkeit von Agri-PV in Thüringen besser einschätzen zu können. Detaillierte Informationen zu diesen Untersuchungen sind in Kapitel 11 - Messkonzept flankierende F&E Maßnahmen sowie im Anhang dieses Dokuments zu finden.

Die folgenden Tabellen bieten einen Überblick über die im Rahmen von *Agri-PVThue* in Zusammenarbeit mit dem TLLLR und dem TLPVG untersuchten Fruchtfolgen und Kulturen. Jede Zeile stellt eine agrartechnisch und phytosanitär umsetzbare Fruchtfolge dar.

Tabelle 3 Überblick über die im Rahmen von Agri-PVThue in Zusammenarbeit mit dem TLLLR und dem TLPVG untersuchten Fruchtfolgen und Kulturen. Bei Option 1 sind die Ertragsverluste eher gering, jedoch nicht ausgeschlossen, da ungeeignete Kulturen wie Erbsen und Mais für Untersuchungszwecke eingeschlossen wurden. Auch die anderen Optionen beinhalten schattenempfindliche Kulturen.

Option 1:

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1.	WW	SG	WG	Raps	WW	Erbse	SG	Öllein	WW	Raps	Dinkel
2.	WW	SG	Raps	WG	Mais	SG	Erbse	Dinkel	Raps	SG	Mais
3.	WW	SG	Erbse	WW	Raps	WG	Mais	WW	Soja	WW	Raps

Option 2

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1.	SG	WW	Raps	Dinkel	AB	WW	Öllein	Roggen	Mais	WW	Erbse
2.	SG	WW	Erbse	WG	Raps	SG	Mais	WG	Lup	Roggen	Raps
3.	SG	WW	Öllein	Durum	Mais	WG	Soja	WW	Raps	Dinkel	SG

Option 3

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1.	WW	SG	Soja	WW	SoBl	Hafer	Raps	WW	AB	WG	Öllein
2.	WW	SG	Mais	Dinkel	Erbse	WW	SG	Roggen	Raps	WW	Soja
3.	WW	SG	Raps	Roggen	Öllein	WG	Lup	Dinkel	SG	Raps	WW

Option 4

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1.	SG	WW	Erbse	WW	SoBl	Dinkel	Raps	SG	AB	WG	Raps
2.	SG	WW	Öllein	Dinkel	Soja	WW	SoBl	Roggen	Raps	WW	Erbse
3.	SG	WW	Mais	WG	Raps	SG	Lup	WW	SoBl	Dinkel	Öllein

Einige in Kapitel 8 erwähnte und beispielsweise in Abbildung 10 aufgeführte Kulturen sind in dieser Fruchtfolge nicht enthalten. Dies liegt am fehlenden erforderlichen Gerät auf Seiten des TLPVG und stellt keinen generellen Ausschluss hinsichtlich ihrer Eignung unter Agri-PV-Bedingungen dar.

Abschließend ist noch zu bemerken, dass das TLPVG als Versuchsgut Ertragsverluste von über 30 % im Rahmen eines pflanzenbaulichen Versuches tolerieren kann. Aus diesem Grund sind in den dargestellten Fruchtfolgen auch Kulturen enthalten, die weniger schattentolerant sind und daher eine eingeschränkte Eignung aufweisen. Wie in Tabelle 2 und Abbildung 10 in

Kapitel 8 dargestellt, können diese Kulturen Ertragseinbußen von mehr als 30 % erfahren, wodurch sie dann nicht den Anforderungen der DIN SPEC entsprechen könnten.

Aus diesem Grund wird im Folgenden eine optimierte Fruchtfolge (Tabelle 4) vorgestellt, die auf dem aktuellen Stand der Wissenschaft basiert und keine Ertragseinbußen über 30 % erwarten lässt. Die hier aufgeführten Kulturen zeigen eine ausreichende Schattentoleranz und haben sich in verschiedenen Studien als geeignet für den Anbau unter PV-Anlagen erwiesen. In einigen Fällen konnten unter diesen Bedingungen sogar Ertragssteigerungen beobachtet werden.

Tabelle 4 Risikoarme Fruchtfolge für mögliche Ackerkulturen in Thüringen*

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1.	WW	SG	WG	Raps	WW	AB	SG	GF	WW	Raps	Dinkel
2.	WW	SG	Raps	WG	KA	SG	AB	Dinkel	Raps	SG	KA
3.	WW	SG	AB	WW	Raps	WG	KA	WW	GF	WW	Raps

* mögliche Ertragsverluste durch Verschattung gering

8) Prüfung Ertragsaussichten

8.1) Energieertrag

Eine Einschätzung des zu erwartenden Energieertrags auf einer Fläche gestaltet sich als herausfordernd, da dieser stark vom gewählten System (feststehend, einachsiges Tracking, zweiachsiges Tracking), dem Abstand zwischen den Modulreihen sowie der Verwendung eines Tracking-Systems abhängt. Axiale Tracking-Systeme können durch die Nachführung der Module bis zu 30 % höhere Stromerträge generieren (Fraunhofer ISE, 2024).

Um negative Auswirkungen auf das Stromnetz durch Mittagsspitzen zu vermeiden, können die Module bei Tracking-Systemen auch, wie in Abbildung 8 gezeigt, gegen die Sonne ausgerichtet werden. Da die Maximierung des landwirtschaftlichen Ertrags das primäre Ziel dieses Konzepts ist, wird das sogenannte Anti-Tracking kurz erläutert. Anti-Tracking ist ein Tracking-Algorithmus, der die Module so steuert, dass sie den Lichtbedarf der Pflanzen möglichst optimal abdecken.

Das Anti-Tracking von Modulen, die ost-westlich nachgeführt werden, sorgt dafür, dass die Bildung von Kernschatten verhindert oder vermindert wird (Vandest & Hemetsberger, 2021). Das Ziel ist hier, die Lichtintensität und die Homogenität der Beleuchtung der landwirtschaftlichen Kulturen zu erhalten. Zusätzlich können durch diese Methode Energieertragsspitzen während der Mittagszeit vermieden werden, was die Netzverträglichkeit erhöht.

Eine weitere Anwendung für Antitracking wäre, die Module morgens und abends so auszurichten, dass mehr Licht verfügbar ist, wodurch das Niveau der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) für die Pflanzen erhöht wird. Dies erlaubt eine saisonale Anpassung der Module, um in kritischen Entwicklungsphasen eine höhere PAR zu erreichen, als dies mit fest installierten Modulen möglich wäre. Gleichzeitig könnte ein höherer Bodenbedeckungsgrad (Ground Cover Ratio, GCR) gewählt werden, da der Lichteinfall gezielt gesteuert werden kann (Hörnle et al., 2021). Die GCR wird in Prozent angegeben, wobei ein höherer GCR-Wert eine höhere Moduldichte und somit höhere Energieerträge pro Fläche bedeutet. Da eine höhere Moduldichte die Lichtverfügbarkeit für die Pflanzen beeinträchtigen kann, stellt das Anti-Tracking eine geeignete Lösung dar, um sowohl den Energieertrag als auch den landwirtschaftlichen Ertrag zu maximieren.

Der Schutz von Pflanzen vor Umwelteinflüssen spielt bei Tracking- und Anti-Tracking-APV-Anlagen eine besonders wichtige Rolle. Der Wechsel zwischen Anti-Tracking und Tracking trägt nicht nur dazu bei, die landwirtschaftlichen Flächen effizienter zu nutzen, den Stromertrag zu maximieren und die PAR für die Pflanzen zu erhöhen, sondern bietet auch Schutz der Kulturen vor extremen Wetterereignissen wie Hagel, Schneefall, Starkregen, Frost und Sonnenbrand (Vandest & Hemetsberger, 2021) (Abbildung 8).

Trotz der vielen Variablen, die den Energieertrag beeinflussen können, lassen sich anhand von Praxisbeispielen Schätzungen der möglichen Erträge pro Hektar anstellen. Das Fraunhofer-



Abbildung 8 Mögliche Schutzwirkungen der Module für die Kulturen durch verschiedene Ausrichtungswinkel bei Tracking-Systemen (Vandest und Hemetsberger 2021)

Institut geht bei einem hoch aufgeständerten APV-System, unter dem lichtbedürftige Ackerkulturen wie Getreide oder Ölpflanzen wachsen, von größeren Reihen- und Modulabständen aus. Für ein solches System wird ein Energieertrag von etwa 600 kWp pro Hektar angenommen. Diese Daten basieren auf Erkenntnissen der APV-Anlage in Heggelbach, die feststehende, nach Südwesten ausgerichtete PV-Module verwendet.

Wenn bei einer solchen Anlage statt fester PV-Module ein einachsiges Tracking-System installiert würde, könnten die Erträge um etwa 15 bis 30 % gesteigert werden (Fraunhofer ISE, 2024). Für eine APV-Anlage, die den Schwerpunkt auf den landwirtschaftlichen Nutzen legt und einachsige nachgeführte Tracking-Module verwendet, wäre daher ein maximaler Energieertrag von 700 bis 800 kWp pro Hektar möglich.

Das betrachtete Beispielszenario basiert auf den technischen Spezifikationen des Projekts APV RESOLA in Heggelbach, insbesondere auf der Nutzung bifazialer Glas-Glas-Module und einem Modulreihenabstand von 9,5 m bei einer Modulreihenbreite von 3,4 m. Diese Systemvariante erreichte im Heggelbach-Projekt eine Landnutzungsrate von etwa 160 % (Abbildung 2)(Fraunhofer ISE, 2024). Im Unterschied zum ursprünglichen Projekt wird in diesem Konzept jedoch ein einachsige nachgeführtes Trackingsystem eingesetzt. In diesem Beispielsystem wäre zudem ein Reihenabstand der Stützpfeiler von ca. 30 m vorgesehen, während er im Heggelbach-Projekt nur 18,4 m beträgt. Der vergrößerte Abstand der Stützpfeiler eröffnet das Potenzial, die Landnutzungsrate weiter zu steigern.

Rechnet man dies an einer fiktiven Beispielanlage von 50 ha in Thüringen hoch, so sind Erträge von circa 35 bis 40 Megawattpeak (MWp) an erneuerbarer Energie realistisch. Diese Anlagengröße wurde aufgrund der relativen, höheren Rentabilität (siehe Kapitel 5 & 10) und den Größen der durchschnittlichen Schläge (Kapitel 1) in Thüringen als Beispiel gewählt.

Eine realistische Beispielrechnung zeigt, dass eine Anlage mit 14 Metern Spannweite auf einem Hektar etwa 774 kWp erzeugen kann. Auf einer 50 Hektar großen Fläche wären somit rund 38,7 MWp möglich.

Während eine Standard-FFPV-Anlage auf 50 Hektar eine Leistung von bis zu 50 MWp erreichen könnte (Umweltbundesamt, 2023), würde die APV-Beispielfläche etwa 20 % weniger Energie erzeugen. Dieser vermeintliche Nachteil wird jedoch durch die Möglichkeit der gleichzeitigen landwirtschaftlichen Nutzung und den Schutz von Kulturen und Boden kompensiert.

Da Anti-Tracking hauptsächlich während der Mittagsstunden angewendet wird, um Netzengpässe zu vermeiden, sind die daraus resultierenden Ertragsverluste gering. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Strompreise am Markt in dieser Zeitspanne niedrig oder sogar negativ sind. Positive Effekte auf das Pflanzenwachstum, bedingt durch erhöhten Lichteinfall in kritischen Wachstumsphasen im Frühjahr, könnten im Herbst kompensiert werden, wenn kein Anti-Tracking erforderlich ist, da in dieser Jahreszeit üblicherweise keine Kulturen mehr unter der APV-Struktur angebaut werden.

8.2) Landwirtschaftlicher Ertrag

Der landwirtschaftliche Ertrag unter APV wird, ebenso wie der Energieertrag, von zahlreichen Faktoren beeinflusst. Die Schattentoleranz der angebauten Kulturpflanzen, der Zeitpunkt von Aussaat und Ernte sowie die klimatischen Bedingungen im Jahresverlauf können einen erheblichen Einfluss auf den Ertrag haben.

Die Auswirkungen des Klimawandels auf die Erträge von Ackerkulturen sind bereits sichtbar: Im Vergleich zu 2018 war die Getreideernte im Jahr 2023 um 9 % rückläufig (Ernte in Thüringen 2023). Dies lässt sich auf die Dürrejahre zwischen 2018 und 2022 zurückführen. Es ist zu erwarten, dass klimabedingte Ernteaufälle zunehmen werden. Der Trend zu erhöhter Trockenheit bei gleichzeitig steigender Globalstrahlung ist in der nachfolgenden Grafik (Abbildung 9) deutlich zu erkennen.

Um dem Trend zunehmender Ertragseinbußen durch klimatische Veränderungen entgegenzuwirken, könnte die Agri-Photovoltaik (APV), wie bereits beschrieben, eine vielversprechende Option darstellen.

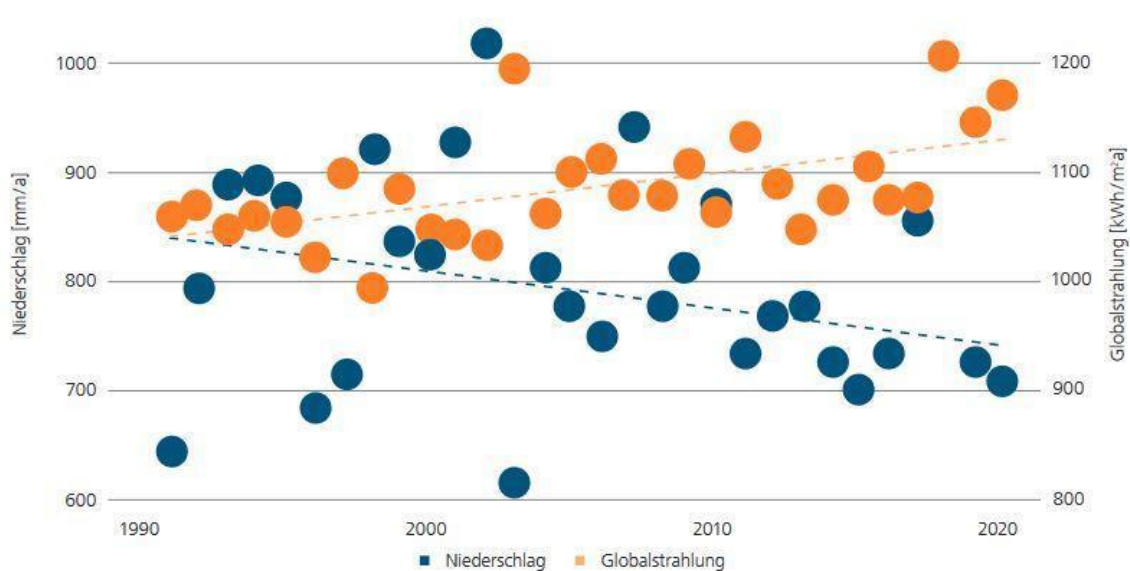


Abbildung 9 Entwicklung der Niederschläge und der Globalstrahlung in Deutschland seit 1991 Daten: Deutscher Wetterdienst. © Fraunhofer ISE

Hoch aufgeständerte Agri-PV-Systeme beeinflussen, unabhängig von ihrer spezifischen Bauart, die Bedingungen unter den Modulen. Zu den betroffenen Faktoren gehören die

Lichtintensität, die Temperatur und die Bodenfeuchtigkeit. Diese essentiellen Faktoren unterliegen durch den Klimawandel starken Schwankungen, was negative Auswirkungen auf die Pflanzenentwicklung hat. PV-Module erzeugen Schatten und verringern dadurch die direkte Sonneneinstrahlung auf die darunter liegenden Pflanzen. Diese reduzierte Lichtintensität kann insbesondere bei lichtliebenden Kulturen zu einer verringerten Photosyntheserate führen. Studien zeigen jedoch, dass die Auswirkungen dieser reduzierten Lichtverhältnisse stark von der Art der Kulturpflanzen und der spezifischen Anordnung der PV-Module sowie vom Lichtsättigungsgrad der Pflanzen abhängen (Laub et al., 2021; Wydra et al., 2022).

Allgemein haben sowohl die Dauer als auch der Zeitpunkt der Verschattung einen erheblichen Einfluss auf den zu erwartenden Ertrag. Wie in den Studien von Dodd et al. (2005) und Laub et al. (2021) gezeigt wurde, sind die Phase des Pflanzenwachstums, in der die Verschattung auftritt, sowie die Gesamtzeit der Verschattung von entscheidender Bedeutung. In Abbildung 10 ist dargestellt, dass sich Kulturen grundsätzlich im Spektrum von schattentolerant bis schattenempfindlich einordnen lassen, wobei diese Darstellung lediglich einen groben Überblick bietet. Einen detaillierteren Einblick in die zu erwartenden Ertragsveränderungen liefern die unten aufgeführte Tabelle 5.

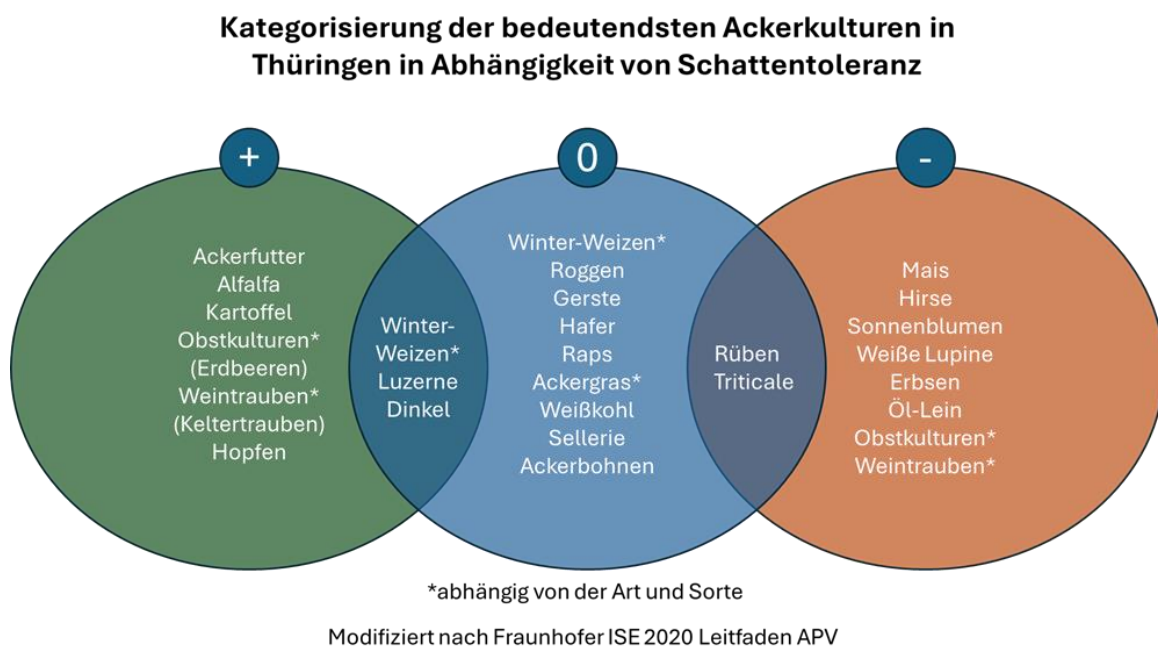


Abbildung 10 Kategorisierung der bedeutendsten Ackerkulturen in Thüringen in Abhängigkeit von Schattentoleranz. Modifiziert nach Fraunhofer ISE 2020 Leitfaden APV

Im Vergleich zur im Rahmen dieses Konzepts erstellten Einteilung der Kulturen hinsichtlich ihrer Schattentoleranz zeigt die obere Grafik einige Abweichungen. Wie weiter unten erläutert, treten häufig erhebliche Unterschiede in den Ertragsprognosen der Kulturen bei

verschiedenen Studien zur Schattentoleranz auf. Dennoch weisen beide Einschätzungen ähnliche allgemeine Tendenzen auf und enthalten keine direkten Widersprüche.

Kulturen mit moderater Schattentoleranz können von den niedrigeren Temperaturen und der höheren Bodenfeuchtigkeit im Schatten der Module profitieren, was beispielsweise in Dürrejahre die negativen Effekte der reduzierten Lichtintensität im Vergleich zu Kulturen auf konventionellen Anbauflächen ausgleicht (Wydra et al. 2022, Pataczek et al., 2023).

Unterschiedliche Ackerkulturen reagieren verschieden auf die veränderten Anbaubedingungen unter Agri-PV-Systemen. Eine Simulation, die in Zusammenarbeit mit der BayWa r.e. AG erstellt wurde, zeigt, dass der Ertrag von lichtempfindlichen Kulturen wie Weizen und Buchweizen reduziert werden könnte, insbesondere wenn die PV-Module so angeordnet sind, dass ein großer Teil des Tageslichts durch Kernschatten blockiert wird.

Obwohl eine Metaanalyse (Laub et al., 2021) durch simulierte Beschattungsversuche eine negative Auswirkung auf den Ertrag von landwirtschaftlichen Kulturen, wie Mais, Getreide und Ölpflanzen aufzeigte, konnten praktische Erfahrungen aus dem Agri-PV-Systemen des Projektes RESOLAR in Dürrejahre positive Effekte durch das unter den Modulen entstehende Mikroklima nachweisen. Diese widersprüchlichen Ergebnisse unterstreichen die Komplexität der Wechselwirkungen zwischen Agri-Photovoltaik und Pflanzenwachstum und zeigen, dass reine Verschattungsversuche nicht ausreichend sind, um den auch positiven Effekt der APV-Anlagen auf Pflanzen zu beurteilen.

Im Rahmen einer Studie von Pataczek et al., 2023 wurde zudem beobachtet, dass der Ertrag von Winterweizen über einen Zeitraum von vier Jahren konstant blieb, im Gegensatz zum Winterweizen auf der Referenzfläche, der starken Ertragsschwankungen aufgrund von Umwelteinflüssen wie Starkregen und insbesondere Dürre unterworfen war. Dies wird unter anderem darauf zurückgeführt, dass die reduzierten Temperaturen im Sommer und die verbesserte Bodenfeuchtigkeit unter den Modulen die Wasserstressbedingungen verringern, die den Ertrag limitieren können.

Im beobachteten Zeitraum wurden in Baden-Württemberg auf der Referenzfläche im Durchschnitt 5,2 Tonnen pro Hektar und auf der APV-Fläche 4,7 Tonnen pro Hektar Getreide geerntet (Pataczek et al., 2023). In Thüringen wurden im Jahr 2023 durchschnittlich 7 Tonnen Winterweizen pro Hektar geerntet (Ernte in Thüringen 2023).

Bei einem durchschnittlichen Ertragsverlust von etwa 10 % würden auf einer APV-Fläche somit etwa 6,3 Tonnen Winterweizen pro Hektar geerntet werden können. Dies geht jedoch mit einer erhöhten Sicherheit einher, dass die Kultur nicht durch extreme Wetterereignisse vor der Ernte beschädigt oder zerstört wird. Zusätzlich sind die finanziellen Vorteile durch die Doppelnutzung in Form von Zusatzeinkommen durch die Stromeinspeisung zu berücksichtigen. Diese sind jedoch stark abhängig vom gewählten Geschäftsmodell und daher fallabhängig zu betrachten.

Abgesehen von den bereits genannten Vorteilen, die sich durch die Beschattung der Kulturen ergeben, spielt auch der Flächenverlust, der durch die Installation von APV-Systemen entsteht, eine entscheidende Rolle bei der Verminderung des landwirtschaftlichen Ertrags. Dieser darf allerdings maximal 10% bzw. 15% betragen. Verschiedene Typen von APV-Anlagen führen zu unterschiedlichen Flächenverlusten. Im Rahmen dieses Konzepts werden hauptsächlich APV-Anlagen nach Kategorie I der DIN SPEC 91434 betrachtet. Eine Anlage, die dieser Definition entspricht, ist die Testanlage in Heggelbach. Diese hoch aufgeständerte Anlage mit südwestlich ausgerichteten, fixen Modulen verursacht einen Flächenverlust von etwa 8 % (Fraunhofer ISE, 2024).

In der Praxis führte dies, kombiniert mit Umwelteinflüssen, zu einem vergleichweisen Ertragsverlust von bis zu 20 % bei Getreide und Ölpflanzen in feuchten Jahren (Fraunhofer ISE, 2024). In Dürrejahren hingegen konnte eine Ertragssteigerung von 3 bis 11 % bei Kartoffeln und Getreide im Vergleich zu Referenzflächen beobachtet werden.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass APV aufgrund günstiger mikroklimatischer Effekte und besserer Wasserspeicherung den Ertrag in Dürrejahren stabilisiert und vergleichsweise erhöht. Die Beschattung durch die Module kann jedoch bei Ackerkulturen, insbesondere in feuchten Jahren, zu Ertragseinbußen führen.

Im Folgenden sind die Ertragsveränderungen für fünf im Ackerbau Thüringens bedeutendste angebaute Kulturen dargestellt. Die Werte werden pro ein Hektar angegeben. Die erwartete Verschattung für diese Flächen beträgt etwa 40 %, die prozentualen Ertragsveränderungen basieren auf wissenschaftlicher Literatur, die sich auf diesen oder einen vergleichbaren Verschattungsgrad bezieht. Es werden jeweils 3 Fälle basierend auf den Ergebnissen dieser Studien angegeben.

Die Rechnung: $\varnothing \text{Ertrag Thüringen} \times \text{Prozent möglicher Ertragsveränderung} = \text{Ertrag}$

Tabelle 5 Mögliche Ertragsveränderungen unter Agri-PV für die Kulturen Winter Weizen, Winter Raps, Kartoffeln, Winter Gerste und Futter Luzerne/ Legumen

	Ohne Agri PV	Mit Agri-PV		
Pflanzliche Kultur	$\varnothing$ Ertrag auf 1 ha ohne APV in Thüringen (Erntebericht in Thüringen 2023)	Ertragsveränderung schlechtester Fall	$\varnothing$ Ertragsveränderung:	Ertragsveränderung bester Fall
Winter Weizen	70 dt /ha	42 - 49 dt/ha	65,3 - 68,1 dt/ha	70 - 83,3 dt/ha
		-40 bis -30 % (Laub et al. 2022)	-6,7 bis +2,7 % (Weselek et al. 2021) (Li et al.2010)	0 bis+19 % (Pataczek et al. 2023) (Corraliza et al. 2019)
Winter Raps	32 dt /ha	18,2 - 22,7 dt/ha	24,3 dt/ha	28,8 dt/ha
		-43 bis -29 % (Rondanin et al. 2014)	-24% (Felix Emanuel Schuck 2022(Modell))	-10% (Felix Emanuel Schuck 2022 (Modell))
Kartoffeln	350 dt /ha	227,5 - 269,5 dt/ha	287 - 304,5 dt/ha	350 - 388,5 dt/ha

		-30 bis -23 % <i>(Laub et al. 2022)</i> <i>(Schulz et al. 2019)</i>	-18 bis -13 % <i>(Fraunhofer ISE 2024)</i> <i>(Lee et al. 2022)</i>	0 bis +11 % <i>(Fraunhofer ISE 2024)</i>
Winter Gerste	79 dt /ha	51,4 - 55,3 dt/ha	65,4 - 70,2 dt/ha	79 – 94 dt/ha
		-35 bis -30 % <i>(Laub et al. 2022)</i>	-17,2 bis -11,2 % <i>(Vaccaro et al. 2022)</i>	0 bis +19 % <i>(Corraliza et al. 2019)</i>
Futter- Luzerne, Legumen	67,5 (TM*) dt /ha	50,6 – 54 (TM) dt/ha	67,5 (TM) dt/ha	94,5 dt/ha
		-25 bis -20 % <i>(Laub et al. 2022)</i> <i>(Dupraz et al. 2023)</i>	+ - 0 % <i>(Dupraz et al. 2023)</i>	+40 % <i>(Edouard et al. 2021)</i>

Wie bereits in Abbildung 10 dargestellt, zeigen die analysierten Pflanzenkulturen eine hohe Varianz in Bezug auf ihre Schattentoleranz. Ebenso ist zu beobachten, dass die Ertragsveränderungen zwischen den jeweiligen Studien teilweise stark voneinander abweichen. Diese Unterschiede sind teils darauf zurückzuführen, dass die Experimente mithilfe von Verschattungsnetzen durchgeführt wurden, die eine gleichmäßigere und umfassendere Verschattung bieten, als dies unter APV der Fall wäre, während positive Schutzfaktoren durch APV weniger Berücksichtigung finden, da der Effekt nicht mit dem von APV vergleichbar ist. Zudem wurden Faktoren wie der intermittierende Lichteinfall durch die Abstände zwischen den Modulreihen sowie die möglichen Effekte von Anti-Tracking-Mechanismen nicht einbezogen, was teilweise zu den im ungünstigsten Fall beobachteten, stark reduzierten Erträgen beiträgt.

Viele „Best-Case“-Studien, die unter realen APV-Bedingungen durchgeführt wurden, zeigen durch die beschränkten Anlagengrößen jedoch potenzielle Randeffekte, die zu Verzerrungen und Ungenauigkeiten in den Ergebnissen führen könnten. Daher erscheint es zur Ermittlung realistischer Ertragsprognosen ratsam, den „durchschnittlichen Fall“ als Vergleichswert heranzuziehen.

Unabhängig von diesen methodischen Unterschieden zeigt sich, dass nur wenige der untersuchten Kulturen im „schlechtesten Fall“ eine Ertragsminderung von mehr als 33 % im Vergleich zur Referenzernte aufweisen können, die als Grenzwert für die Förderfähigkeit gemäß DIN SPEC definiert ist. Daraus lässt sich schließen, dass die meisten Kulturen, insbesondere schattentolerantere Arten, bei einer Verschattung von etwa 40 % Ertragseinbußen zwischen 15 % und 25 % im Vergleich zu Flächen ohne APV aufweisen dürften. Für die Berechnung des Ertrages werden bei APV die Durchschnittserträge von 3 Jahren (also 3 verschiedenen Kulturen) unter einer Anlage ermittelt.

Je nach Kulturart und klimatischen Bedingungen könnten in bestimmten Jahren, insbesondere in Trockenjahren, sogar Ertragssteigerungen auftreten, während in feuchteren und lichtärmeren Jahren mit stärkeren Ertragsminderungen zu rechnen ist. Eine gezielte Anwendung von Anti-Tracking-Technologien könnte hierbei potenziell die Verfügbarkeit von

PAR teilweise ausgleichen und somit Ertragsverluste abmildern (Vandest und Hemetsberger, 2021).

Vor dem Hintergrund dieser komplexen Faktoren und der Unsicherheiten bei bisherigen Studien ist die Durchführung weiterführender Untersuchungen vorteilhaft. Idealerweise sollten diese auf größeren APV-Anlagen stattfinden, um potenzielle Randeffekte zu minimieren und eine höhere Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten. Simulationen, die den Einfluss einer jeweiligen APV-Anlagen auf die darunterliegenden pflanzlichen Kulturen darstellen, werden schon vom Fraunhofer ISE angeboten und können vor Bauvorhaben genutzt werden, um Worst-Case-Outcomes zu verhindern.

9) Wassermanagementsystem

Das Regenwassermanagement gewinnt aufgrund von Klimaveränderungen und zunehmend extremeren Trocken- und Niederschlagsperioden für den wirtschaftlichen und nachhaltigen Betrieb von Agri-PV-Anlagen an Bedeutung. Besonders im Thüringer Becken, wo längere Dürrephasen und sinkende Grundwasserstände die Landwirtschaft stark beeinflussen, ist das Wassermanagement entscheidend.

Untersuchungen zeigen, dass Agri-PV-Anlagen durch ihre physische Struktur den Wasserhaushalt ihrer Umgebung positiv beeinflussen können (Adeh et al., 2018) und gleichzeitig Möglichkeiten zur Regenwassersammlung bieten. Die Integration eines Speicher- und Bewässerungssystems könnte das Wassermanagement auf dem Feld unterstützen und so die landwirtschaftliche Produktivität erhöhen (Rößner, 2022).

Studien aus Indien, weisen darauf hin, dass die Kombination von Solarenergieerzeugung und Regenwassernutzung in Agri-PV-Systemen bei optimaler Systemgestaltung einen autarken Wasser- und Energiehaushalt erreichen kann (Santra et al., 2020). Im Rahmen dieser Studien wurde auf einer Modulfläche von 651 m² über ein Jahr hinweg eine Regenwassermenge von ca. 150.000 Litern aufgefangen. Bei einer durchschnittlichen jährlichen Niederschlagsmenge von 406 L/m² in Jodhpur, Rajasthan (India Meteorological Department, 2024), liegt dieser Wert etwa 28,3 % unter den jährlichen Niederschlagsmengen in Butteltstedt, Thüringen, mit 566 L/m² (Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, 2023). Daraus ergibt sich, dass unter thüringischen Bedingungen bei vergleichbarer Modulfläche jährlich rund 295,6 L/m² Regenwasser gesammelt werden könnten – deutlich mehr als die in der indischen Studie errechneten 230,4 L/m². Auf einen Hektar hochgerechnet, ließe sich so eine jährliche Sammelmenge von ca. 3 Millionen Litern Regenwasser erzielen. Die praktische Umsetzung erfordert jedoch noch die Entwicklung effizienter Speichersysteme.

Weitere Forschung in Deutschland untersucht, wie sich Agri-PV-Anlagen auf den lokalen Wasserkreislauf sowie auf das Wachstum und die Erträge der Kulturen auswirken. Angesichts der steigenden Bewässerungsflächen in Deutschland – von 372.700 Hektar (2009) auf 554.000 Hektar (2022) (Statistisches Bundesamt, 2024), ein Anstieg um 49% – sowie der zunehmenden Dürreereignisse wird die Wasserbewirtschaftung zunehmend relevant.

Seit 2020 untersucht das Thünen-Institut im Rahmen des Verbundprojekts „LAWAMAD“ die Verfügbarkeit von Bewässerungswasser und die zukünftigen Bewässerungsbedürfnisse im Pflanzenbau in Deutschland, mit dem Ziel, eine nachhaltige Wasserversorgung sicherzustellen (Thünen: LAWAMAD – Landwirtschaftliches Wassermanagement Deutschland (Teilprojekt C), 2022).

Niederschlagsdaten aus Butteltstedt, Thüringen, verdeutlichen, dass in den letzten 20 Jahren häufig signifikante Abweichungen vom mittleren Jahresniederschlag auftraten, was auf zunehmende Extremereignisse in Form von Trocken- und Regenjahren hindeutet. Vor diesem

Hintergrund wird ein flexibles Wassermanagement sowie die Speicherung von Regenwasser empfohlen, um die Anpassungsfähigkeit an künftige Klimavariabilität zu erhöhen.

9.1) Monitoring Wassermanagment

Um den Einfluss von Agri-Photovoltaik (APV)-Anlagen auf das lokale Wassermanagement im Thüringer Becken zu quantifizieren, wurden geeignete Messmaßnahmen definiert, deren detaillierte Beschreibung im beigelegten Gutachten zum Wassermanagement enthalten ist (Anhang: „*Wassermanagement - Agri-PVThue Regenwassermanagement im Kontext von Agri-Photovoltaik (APV) Anlagen in Thüringen*“)

Im Kontext von APV-Systemen stellt das Management des Niederschlags einen zentralen Aspekt dar, insbesondere in Hinblick auf die Abschätzung des potenziell auffangbaren Wasservolumens. Die Effizienz der Regenwassersammlung wird durch mehrere Faktoren beeinflusst, darunter Niederschlagsmenge, Windrichtung, Windgeschwindigkeit und die Anordnung der PV-Module. Durch die vergleichende Messung von Niederschlagsmenge und tatsächlich gesammeltem Wasser lassen sich standortspezifische Anpassungen für eine effektive Bewässerungsstrategie ableiten.

Die Untersuchung der Erosionsanfälligkeit der Böden bietet vielseitige Möglichkeiten, um die positiven und nachhaltigen Effekte von Agri-Photovoltaikanlagen zu erfassen. Da die physische Struktur der PV-Anlagen die Verteilung von Regenwasser beeinflusst, ergibt sich die Chance, innovative Ansätze zur Verbesserung der Bodenstabilität zu entwickeln. Eine differenzierte Analyse der Bodenverhältnisse im Vergleich zu unbeeinflussten Referenzflächen könnte wertvolle Erkenntnisse liefern und sollte daher in zukünftige Forschungsprojekte integriert werden. Besonders vielversprechend ist die Frage, ob Vegetationsstreifen, wie Blühstreifen, den Oberflächenabfluss und die Erosion effektiv reduzieren können. Ebenso könnte untersucht werden, wie das gezielte Ableiten von Regenwasser von den Moduloberflächen die Prozesse von Run-Off, Bodenverschlammung und Erosion positiv beeinflusst. Ergänzend dazu wäre eine umfassende Untersuchung der Auswirkungen auf den Grundwasserspiegel im Rahmen eines erweiterten hydrologischen Konzepts sinnvoll. Solche Studien könnten nicht nur den ökologischen, sondern auch den landwirtschaftlichen Nutzen von APV-Systemen weiter steigern.

Ebenso sollte die Rolle der Evaporation und Transpiration als grundlegende Faktoren im Wasserkreislauf umfassend analysiert werden. Die Verschattung durch APV-Module reduziert voraussichtlich die Bodenevaporation und könnte den Wasserbedarf der Pflanzen positiv beeinflussen. Um die Auswirkungen von Agri-PV-Anlagen auf die Bodenfeuchtigkeit und die Verdunstung abschätzen zu können, sollten regelmäßige Messungen der Luftfeuchtigkeit und Temperatur unter den Modulen durchgeführt werden.

Für das Wachstum der Pflanzen und die Erhaltung einer stabilen Bodenstruktur ist eine ausreichende Bodenfeuchte essenziell. Das Zusammenspiel von APV-Systemen und Regenwassermanagement beeinflusst sowohl die Menge als auch die Verteilung des Niederschlags und damit maßgeblich die Bodenfeuchte (Feistel et al., 2022). Um diese Effekte

detailliert zu analysieren, empfiehlt sich der Einsatz von Bodenhygrometern zur Messung der Bodenfeuchte in überdachten und unüberdachten Bereichen zwischen den Modulreihen, ergänzt durch Vergleichsdaten von Referenzflächen. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse können die Effizienz der Bewässerung verbessern, da eine gezielte Steuerung des Wasserbedarfs zu einer gleichmäßigen Verteilung der Bodenfeuchte und einer optimierten Bewässerung beitragen würde.

10) Wirtschaftliche Betrachtung

In diesem Kapitel wird eine wirtschaftliche Betrachtung anhand eines bereits auf dem freien Markt erhältlichen Systems einer europäischen Firma durchgeführt. Der folgende Teil wurde in Zusammenarbeit mit Enerparc erstellt und umfasst die Umsetzung einer 10 MWp Agri-Photovoltaikanlage mit einem hochgestellten APV-Tracking-System auf einer theoretischen Fläche in Thüringen.



Abbildung 11 Krinner Carport Pilotanlage (exemplarisch)

10.1) Eckdaten

Die für dieses Beispiel ausgewählte fiktive Fläche zeichnet sich durch eine ebene Topografie mit minimalen Höhenunterschieden und ohne Verschattung durch Gehölze oder bauliche Anlagen aus. Der zu erwartende Ertrag liegt bei 1.000 kWh/kWp, wobei durch das lineare Tracking (1 P Tracking) der Module ein Leistungsplus von 15-25 % erzielt werden kann. Pro Hektar werden mit bifazialen 600-Watt-Modulen circa 774 kWp installiert.

Das System verwendet eine Einfeldträgerkonstruktion mit einer Spannweite von 14 m und einem Reihenabstand von 11 m bei einer Überkopfhöhe von 5,5 m. Die Module haben Abmessungen von 2.278 x 1.134 x 30 mm. Die Zusammenfassung der Eckdaten findet sich in Tabelle 6.

Tabelle 6 Eckdaten einer modellhaften, hochaufgeständerten APV-Anlage mit Tracking Modulen

Ertrag	1.000 kWh/kWp + 25% Leistung durch 1 P Tracking der Module
Leistung	774 kWp/ha mit 600 Watt Modulen (bifazial)
Spannweite Träger	14 m
Reihenabstand	11 m
Über Kopfhöhe	> 5,5 m
Module	2.278 x 1.134 x 30 mm

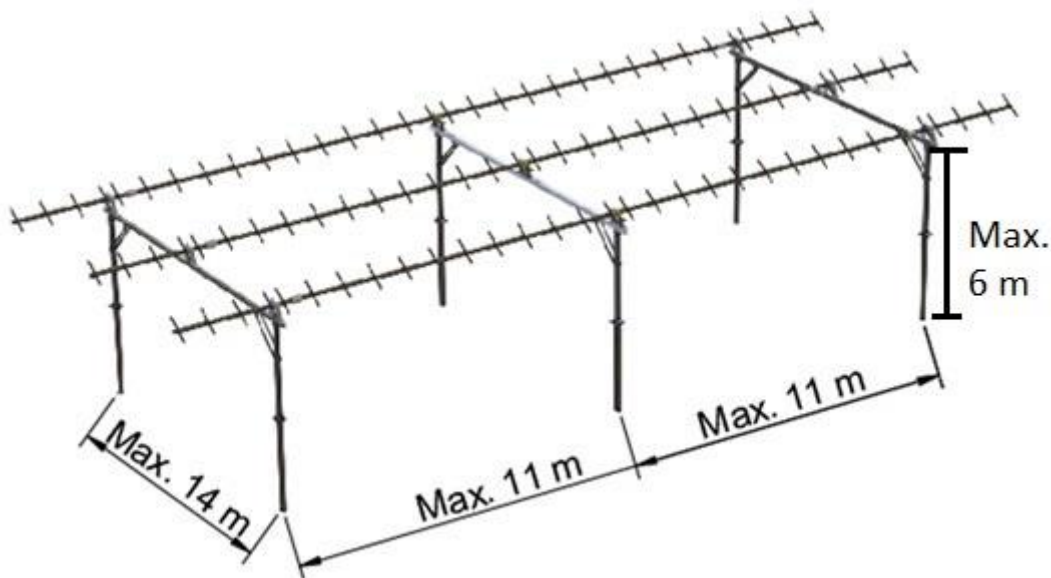


Abbildung 12 Skizze Gestellsystem einer hochaufgeständerten APV-Anlage

10.2) Geschäftsmodelle

Die Realisierung von Agri-Photovoltaik-Projekten erfordert die Berücksichtigung verschiedener Akteursgruppen, die sich anhand von vier zentralen Funktionen differenzieren lassen: (1) die Bereitstellung der landwirtschaftlichen Fläche (Eigentum), (2) die Bewirtschaftung der Fläche im Rahmen landwirtschaftlicher Nutzung, (3) die Bereitstellung und Investition in Agri-Photovoltaik-Systeme sowie (4) der Betrieb des Photovoltaik-Systems. Darüber hinaus spielt die gesellschaftliche Akzeptanz eine zentrale Rolle, die durch die Einbindung relevanter Akteursgruppen, wie beispielsweise der Kommunen, gefördert werden kann (Trommsdorff et al., 2023).

Ein grundlegendes Geschäftsmodell besteht darin, dass alle vier genannten Funktionen von einer einzigen Partei, in der Regel der Landwirtin oder dem Landwirt, übernommen werden. Dieses Modell eignet sich insbesondere für kleinere, landwirtschaftliche Anlagen, bei denen die Landwirt:innen sowohl das Eigentum an der Fläche halten als auch die Investitionen in die Agri-Photovoltaik-Systeme selbst tragen können. Zu den wesentlichen Vorteilen dieses Modells zählen die vergleichsweise geringen Kosten für die Projektierung, eine vereinfachte Vertragsgestaltung sowie ein hoher Dezentalisierungsgrad. Zudem ermöglicht die Integration der landwirtschaftlichen und energetischen Nutzung durch eine einzige Person eine flexible und dynamische Berücksichtigung der Wechselwirkungen zwischen beiden Ebenen (ebd.).

In vielen Fällen befindet sich das Land jedoch nicht im Eigentum derjenigen, die es landwirtschaftlich bewirtschaften. Dies trifft insbesondere auf größere Agri-Photovoltaik-Anlagen zu, bei denen es zudem weniger verbreitet ist, dass diese im Privatbesitz betrieben werden. In solchen Szenarien steigt die Wahrscheinlichkeit, dass Fremdkapital oder externe Investitionen eine wesentliche Rolle bei der Realisierung des Projekts spielen (siehe unten). Ein Modell des Teileigentums könnte in diesem Zusammenhang dazu beitragen, die Anreizstrukturen für eine synergetische Doppelnutzung der Flächen zu erhalten. Allerdings geht mit einem höheren Fremdkapitalanteil die Herausforderung einher, die Zielsetzungen und Vorteile beider Produktionsstufen – der landwirtschaftlichen und der energetischen – gleichermaßen zu berücksichtigen. Gleichzeitig bietet dieses Modell Potentiale für Skaleneffekte sowie Effizienzsteigerungen durch eine stärkere Arbeitsteilung zwischen den beteiligten Akteuren (ebd.). Eine Auflistung der verschiedenen Geschäftsmodelle finden sich in Tabelle 7.

Tabelle 7 Geschäftsmodelle und Akteure (verändert nach Vollmer 2022)

Geschäftsmodell	Funktion			
	Flächenbereitstellung	Landwirtschaftliche Bewirtschaftung	PV-System Bereitstellung	PV-System Betrieb
Basisfall	Landwirtschaftsbetrieb			
Externes Landeigentum	Flächenbesitzer	Landwirtschaftsbetrieb		
Externes PV-Investment	Landwirtschaftsbetrieb		PV-Investor	Landwirtschafts-betrieb
Nur Bewirtschaftung und Betrieb	Flächenbesitzer	Landwirtschafts-betrieb	PV-Investor	Landwirtschafts-betrieb
Nur Bewirtschaftung	Flächenbesitzer	Landwirtschafts-betrieb	PV-Investor	PV-Investor / Betreiber

In der Folgenden Kostenbetrachtung wird sich hauptsächlich auf das Geschäftsmodell “Nur Bewirtschaftung” bezogen, wo Flächenbesitzer und landwirtschaftlicher Betrieb eine feste Pacht erhalten.

10.3) Kostenbetrachtung

Diese kostenbezogene Untersuchung bietet Einblicke in die technischen, wirtschaftlichen und planerischen Anforderungen eines solchen Projektes (Tabelle 8).

Die Entwicklungskosten eines solchen Solarparks umfassen unter anderem die Grundlagenermittlung, Bauleitplanung sowie technische und Genehmigungsplanungen und belaufen sich vor Baubeginn auf etwa 500.000 Euro. Die Gesamtkosten für das Tracker-System werden mit 1.250 Euro pro kWp angegeben, einschließlich sämtlicher Bau- und Betriebskosten.

Die Kostenstruktur gliedert sich in mehrere Bereiche: Entwicklungskosten, Tiefbau, Montage der Unterkonstruktion und Module, Verkabelung sowie Maßnahmen zum Umwelt- und Landschaftsschutz. Zusätzlich sind Trassenplanungen und die Anbindung der Anlage an eine Übergabestation enthalten. Die Produktionskosten inklusive Anschluss, Trafostation und Trassenbau summieren sich auf 12,5 Millionen Euro. Dabei liegen die jährlichen Betriebskosten bei etwa 60.000 Euro, ergänzt durch einen jährlichen Pachtzins von 26.000 Euro.

Die Wirtschaftlichkeitsberechnung zeigt, dass bei einem aktuellen Einspeisetarif von 5,7 Cent/kWh eine interne Verzinsung (IRR) von lediglich 1,2 % erreicht wird. Mit den verbesserten Förderbedingungen des Solarpakets I, das einen Einspeisetarif von 7,6 Cent/kWh vorsieht, könnte die IRR auf 5 % steigen. Die Laufzeit des Solarparks wird auf 30 Jahre und die des Kredits auf 20 Jahre angesetzt, wobei der jährliche Energieertrag auf 12,5 Millionen kWh geschätzt wird. Für eine bessere Übersicht sind diese Punkte unten in Tabelle 9 zusammengefasst.

Tabelle 8 Aufschlüsselung der Anlagenkosten

Aufschlüsselung der Anlagenkosten unterteilt in die wichtigsten Kostengruppen	
	Leistung
Material	Sämtliche Komponenten und Teile, die zum Bau benötigt werden
Anlaufkosten	Vermessung Baufeld + Medien
	Streckensicherung und Dokumentation (Anfahrt- / Abfahrt)
	Baustelleneinrichtung
	Sicherung CEF (compensatory ecological measures, dt. kompensatorische ökologische Ausgleichsmaßnahmen) und Ausgleichsmaßnahmen*
Gründung / Tiefbauarbeiten	Gründungsarbeiten Wechselrichter
	Gründungsarbeiten Trafostationen
	Setzen der Spinnanker
	Verkabelung
	Realisierung der Zuwegung
Aufbau Unterkonstruktion	Mietkosten Montagetechnik
	Montage
	Unterkonstruktion
	Träger Tracker-System
Aufbau Komponenten	Montage Trägersystem Modul
	Montage Module
	Montage Wechselrichter / Trafostationen
	Verkabelung der Komponenten
Umwelt*	Realisierung der CEF Maßnahmen Artenschutz
	Realisierung von Kompensationsmaßnahmen Lebensraum
	Realisierung von Maßnahmen für den Landschaftsschutz
Trassenplanung	Trassenplanung und Sicherung
	Trasse 3 km bis Übergabestation
	Übergabestation
Inbetriebnahme	Sämtliche erforderliche Leistungen, die für den Betrieb der Anlage notwendig sind

**Notwendigkeit je nach Einzelfall*

Tabelle 9 Wirtschaftlichkeitsdaten einer modellhaften, hochaufgeständerten APV-Anlage mit Tracking Modulen

Finanzierungsdaten	Kosten
Produktionskosten inkl. Anschluss und Trasse	12.500.000 €
Zinssatz	3,40 %
Eigenkapital	20,00 %
Pachtzins (jährlich)	26.000 €/Jahr
Betriebskosten	60.000 €/Jahr
Tarif vor Solarpaket 1 (+0,7 ct/kWp)	5,70 ct/kWp
Tarif mit Solarpaket 1	7,60 ct/kWp
Laufzeit Solarpark	30 Jahre
Laufzeit Kredit	20 Jahre
Ertrag	12.500.000 kWh/a

IRR* vor Solarpaket 1 (aktuell)	1,2 %
IRR* mit Solarpaket 1	5,00 %

** Internal Rate of Return*

Die Analyse unterstreicht, dass linear geführte Überkopf-Tracker-Systeme durch geringe Verschattung und gezielte Förderung des Pflanzenwachstums besonders gut für die landwirtschaftliche Produktion geeignet sind. Allerdings sind diese Systeme aufgrund ihrer aufwendigen Konstruktion etwa doppelt so teuer wie Freiflächen-Photovoltaikanlagen. Verbesserte Fördersätze, wie sie für das Solarpakets I beschlossen wurden, werden die wirtschaftliche Attraktivität dieser Technologie weiter verbessern. Zudem bieten Überkopf-Systeme Vorteile wie geringeren Verschleiß, höhere Stabilität bei Extremwetterereignissen, hohen Schutz vor Starkwetterschaden bei den pflanzlichen Kulturen und die Möglichkeit, zusätzliche Komponenten wie Bewässerungssysteme zu integrieren.

Die Wirtschaftlichkeit des Projekts hängt entscheidend von den aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen ab, insbesondere vom Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG). Eine zeitnahe Bestätigung des Solarpakets 1 durch die EU ist von zentraler Bedeutung für die Rentabilität zahlreicher APV-Projekte. Wie oben dargestellt, erhöht sich die interne Verzinsung (IRR) durch die zusätzliche Förderung auf 5 %. Dies basiert auf einem Vergütungssatz von 7,6 Cent/kWp, der für Anlagen mit einer Leistung über 1 MWp gilt. Für einige innovative APV-Anlagen oder kleinere Systeme könnte diese Vergütung sogar auf bis zu 9,5 Cent/kWp steigen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Perspektiven für Agri-PV dank der erwarteten Förderungen und Vereinfachungen durch das Solarpaket I wirtschaftlich interessant sind. Zudem sind einige europäische Länder unter anderem Italien dazu übergegangen, auf landwirtschaftlichen Flächen nur noch APV zuzulassen (SolarInput, 2024). Es wird deshalb erwartet, dass die verbesserten Rahmenbedingungen eine schnellere Einführung und Verbreitung von APV-Systemen ermöglichen werden. In Zukunft wird Agri-PV eine zentrale Rolle in der Energiewende spielen, indem es erneuerbare Energien direkt in ländliche Gebiete integriert und Landwirt:innen eine zusätzliche Einnahmequelle oder eine Kostenersparnis bei der Eigennutzung bietet. APV kann der Landwirtschaft auch in Zeiten des Klimawandels helfen, den steigenden Energiebedarf für Mobilität, Kühlung und lokale Verarbeitung kostengünstig, lokal und nachhaltig zu decken. Dies stärkt nicht nur die lokale Wertschöpfung und die wirtschaftliche Stabilität landwirtschaftlicher Betriebe und Regionen, sondern unterstützt auch das Erreichen der Unabhängigkeit von Energieimporten sowie das Erreichen der Klimaziele bis 2030 bzw. 2045.

10.4) Wertschöpfung

Die APV bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten zur Wertschöpfung, die sowohl landwirtschaftliche Betriebe als auch regionale Wirtschaftskreisläufe stärken können. So trägt die effiziente Doppelnutzung von Flächen durch APV nicht nur zu einer Einkommensdiversifizierung bei, sondern auch zu einer Ertragsstabilisierung und zum Ernteschutz durch eine Überdachungsfunktion (APV RESOLA, 2024; Wydra et al., 2022). Dies ist besonders in Bezug auf klimabedingte Ernteschädigung essentiell. Auch die Energieautonomie ländlicher Regionen wird durch APV gestärkt, da der Strom nicht nur für den Eigenbedarf auf den landwirtschaftlichen Betrieben genutzt werden kann, sondern auch in das lokale Stromnetz eingespeist werden, um die Versorgungssicherheit in der Region zu erhöhen. Innerhalb der Betriebe ermöglicht die gewonnene Elektrizität beispielsweise, nahegelegene Ställe zu beheizen oder Erntegut zu klimatisieren bzw. zu kühlen. Dies trägt zur Erhaltung der Qualität des Ernteguts bei und ist besonders für empfindliche Kulturen wie Gemüse und Obst von Bedeutung. Im Ackerbau hingegen spielt die Trocknung von Erntegut wie Getreide eine größere Rolle (DLG-Fachbereich Landtechnik, 1996). Die Trocknung ist hier unerlässlich, um die Lagerfähigkeit zu gewährleisten und die Qualität des Getreides zu erhalten. Dieser energieintensive Prozess könnte durch die lokal erzeugte Energie aus APV-Anlagen effizienter gestaltet werden, was die Kosten für die Landwirt*innen senken würde. Zudem reduziert die Überdachung durch die PV-Module die Feuchtigkeit des Ernteguts, insbesondere die Oberflächenfeuchtigkeit während der Erntephase (Fraunhofer ISE, 2024).

Die Aufständigung der APV-Anlagen bietet zusätzlich die Möglichkeit, Bewässerungssysteme kostengünstig und logistisch einfach über den Kulturen zu installieren, wo dies gewünscht ist, oder Tröpfchenbewässerung zu unterstützen. Dies kann Ertragsverluste in Monaten mit Trockenstress drastisch reduzieren (Wydra et al., 2022). Über diese Systeme könnte nicht nur die Bewässerung, sondern möglicherweise auch die Applikation von Pflanzenschutz- und Düngemitteln erfolgen (Chemigation | NDSU Agriculture, 2021). Es gibt bereits Praxisbeispiele

für die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (Fertigation und Chemigation) durch Überkopfsprühanlagen in Gewächshäusern und Ackerbau, allerdings wurde diese Technologie in Verbindung mit APV bisher noch nicht getestet. Fertigation und Chemigation entsprechen zwar der EU-weiten BMP „Best Management Practice“ (dt. „Gute Landwirtschaftliche Praxis“), die Zulässigkeit im aktuellen rechtlichen Rahmen muss allerdings noch geprüft werden. Für Sonderkulturen und höherwertige Kulturen könnten die Pfeiler der Aufständigung auch zur Installation von Schutzsystemen wie Insekten- und Vogelschutznetzen sowie mit Hagelschutznetzen zwischen den Modulreihen, genutzt werden, was jedoch bei Ackerkulturen kaum in Frage käme. In einigen Kulturen kann die Aufständigung auch die Funktion einer Rankhilfe einnehmen, dies ist beispielsweise bei Dauerkulturen wie dem Hopfenanbau essenziell.

Ökologisch gesehen unterstützt APV den Ausbau erneuerbarer Energien, reduziert den CO₂-Fußabdruck und kann sogar positive Auswirkungen auf das lokale Mikroklima haben. Die durch die Aufständigung der Anlage nicht nutzbare landwirtschaftliche Fläche kann durch Blühstreifen, Ankerpflanzen, mehrjährige Strukturen und Nisthilfen aufgewertet werden, was die Biodiversität der Agrarlandschaft positiv beeinflusst.

Gleichzeitig ermöglicht APV Landwirt*innen zusätzliche Einnahmen zu generieren und somit ihre wirtschaftliche Situation zu verbessern. Dies fördert die Stärkung ländlicher Regionen und kann zur Sicherung von Arbeitsplätzen beitragen. Darüber hinaus kann APV die Akzeptanz erneuerbarer Energien in der Bevölkerung erhöhen und die regionale Wertschöpfung steigern. Eine weitere Möglichkeit, wie APV die lokale Wertschöpfung fördern kann, ist die erhöhte Nachfrage nach Fachkräften für die Wartung und den Aufbau der Anlagen (Fraunhofer ISE, 2024). Der lokal erzeugte Strom unterstützt zudem die wirtschaftliche Entwicklung der Region, indem er energieintensive Industriesektoren anzieht, die von der günstigen und direkten Stromversorgung aus APV-Anlagen profitieren. So könnte langfristig die Schaffung von mehr Arbeitsplätzen in strukturschwachen ländlichen Gebieten gefördert werden

Agri-PV bietet somit ein großes Potenzial zur Steigerung der regionalen Wertschöpfung und zur Stärkung des Wirtschaftsstandorts Thüringen.

11) Messkonzept flankierende F&E Maßnahmen

11.1) Basis Konzept

Das Basiskonzept, spiegelt den grundlegenden Umsetzungsvorschlag einer Agri-PV Anlage in Zusammenarbeit bzw. auf den Flächen, in Bewirtschaftung durch das Thüringer Landesamtes für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR) wider. Innerhalb dieses Basiskonzeptes soll die Bewirtschaftung und das wissenschaftliche Monitoring unter den einfachsten Bedingungen zusammengefasst werden. Es baut auf den Grundlagen des *Agri-PVThue*-Projekts auf, wobei darauf geachtet wurde, dass die Umsetzung ohne zusätzliche finanzielle Mittel und mit den bereits vorhandenen Ressourcen des TLLLR möglich ist. Die vorgeschlagene Fruchtfolge ist so konzipiert, dass sie mit den regulären Maschinen und dem Personal des Amtes, das derzeit 1.800 Hektar an drei Standorten bewirtschaftet, bearbeitet werden kann.

Kern des *Agri-PVThue*-Projekts ist ein robustes Fruchtfolgekonzept, das eine effiziente und nachhaltige Nutzung der landwirtschaftlichen Flächen unter den Solarmodulen gewährleistet. Im Basiskonzept werden vier Varianten für umsetzbare Fruchtfolgen unter der Bewirtschaftung des TLPVG vorgestellt. Die Annahme für die Fruchtfolge ist, dass auf einem Feld von 50 ha drei verschiedene Kulturen angebaut werden könnten. Jede Variante repräsentiert eine passende Fruchtfolge, die agrotechnisch und phytosanitär realisierbar ist. Die vier praxisorientierten Fruchtfolgevarianten dienen als Ausgangspunkt für die Untersuchungen. Allerdings besteht noch Forschungsbedarf, um die optimale Anpassung der Fruchtfolgen an die spezifischen Bedingungen unter Agri-PV-Anlagen, insbesondere in den trockeneren Regionen Thüringens, zu ermitteln. Dabei wird von einer Feldgröße von etwa 20-50 Hektar ausgegangen, auf der drei verschiedene Kulturen angebaut werden können.

Das Basiskonzept stützt sich auf etablierte landwirtschaftliche Praktiken und erfordert keine aufwändige, wissenschaftliche Begleitforschung. Die Bewertung der Ertragsentwicklung und Qualität erfolgt über handelsübliche Verfahren (Handelsanalysen: Bodenparameter über eingelassene Bodensonden, N-Sensorik, Pflanzenanalysen, Handelsanalysen, Ertragshöhe). Um jedoch die Wechselwirkungen zwischen Solarmodulen und Pflanzenwachstum detaillierter zu untersuchen und die langfristige Nachhaltigkeit von Agri-PV-Systemen zu gewährleisten, sind gezielte Forschungsvorhaben von großer Bedeutung. Detailliertere Angaben zur Umsetzung des Basiskonzeptes finden sich im Anhang „*Basiskonzept für die Bewirtschaftung einer Agri-PV Anlage durch das Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR)*“ dieses Dokuments.

11.2) Maximalkonzept

Für die Durchführung weiterführender Monitoring-Aktivitäten, wie etwa zur Untersuchung von Bodenparametern, ergänzend zu den regulären Handelsanalysen, ist die Akquise zusätzlicher Fördermittel erforderlich. Diese Mittel ermöglichen vertiefte Forschungsarbeiten und tragen zur Erweiterung der wissenschaftlichen Datengrundlage bei.

Die Materialforschungs- und Prüfanstalt Weimar (MFPA) bietet einige Dienstleistungen von Planung über Umsetzung bis hin zur Betreuung von Boden und Mikroklima an. Diese sind im Anhang „Leistungsportfolio Messkonzept der Materialforschungs- und Prüfanstalt Weimar im Rahmen des Agri-PV-Projektes im Maximalkonzept“ aufgeschlüsselt.

Einige dieser möglichen Monitoringmaßnahmen werden im Folgenden ausgeführt:

11.3) Wissenschaftliches Monitoring von Wasserversorgung und Bodenfaktoren

Es ist bekannt, dass der Bau von Agri-Photovoltaik (APV)-Anlagen die boden-physikalischen, -chemischen und -biologischen Eigenschaften beeinflussen kann. Diese Effekte sind häufig positiv; Studien zeigen beispielsweise, dass die Wasserkapazität von Böden unter APV-Anlagen aufgrund des entstehenden Mikroklimas erhöht wird (Kellner, 2022). Allerdings können bei unzureichendem Wassermanagement auch negative Effekte auftreten, wie etwa Erosion durch herabfallendes Wasser an den Modulkanten (Kellner, 2022). Da viele dieser vor allem negative Effekte bislang nur unzureichend in vergleichbaren Studien untersucht wurden, ist ein umfassendes Boden- und Klimamonitoring bei Forschungs- und Demonstrationsanlagen für APV von erheblicher Bedeutung.

Ein robustes Boden- und Klimamonitoring für APV-Anlagen in Thüringen erfordert die Erfassung grundlegender Standortparameter, darunter Relief, Geologie und Geländeexposition. Diese Parameter können zuverlässig über digitale Geländemodelle (DGM) und Oberflächenmodelle, geologische Karten sowie digitale Orthophotos (die eine hochpräzise und verzerrungsfreie Darstellung der Erdoberfläche bieten) ermittelt und in einem Geoinformationssystem (z.B. QGIS oder ArcGIS) analysiert werden. Bisherige Studien zur Begleitforschung für APV-Anlagen haben diese Parameter oft nur unzureichend berücksichtigt, was Vergleichsdaten für Kontroll- und Testflächen erschwert. Die bestehenden Daten basieren meist auf großmaßstäbigen Karten und traditionellen, niedrig auflösenden Messverfahren, wodurch präzise Vergleiche, insbesondere über kürzere Zeiträume, kaum möglich sind.

Um ein belastbares Monitoring zu gewährleisten, werden präzise Standortanalysen und differenzierte Bodenkartierungen empfohlen, unabhängig von der Anlagengröße. Dies legt eine Grundlage für langfristige Vergleiche von APV-Flächen und Kontrollflächen im Ausgangszustand sowie nach 5–10 Jahren Nutzung.

Für ein Boden- und Klimamonitoring im Kontext von Agri-PV-Forschungsanlagen in Thüringen werden folgende Maßnahmen empfohlen:

1. Kartierung der Standortverhältnisse:

- Berücksichtigung von Relief, Geologie (besonders hinsichtlich der Bodenbildung) und Geländeexposition.

- Übertragung dieser Parameter in digitale Modelle (z.B., Digitales Geländemodell (DGM) und Digitales Oberflächenmodell (DOM) mit mindestens 1 m Auflösung; bei kleineren Anlagen idealerweise 20 cm).
- Auswahl möglichst homogener Standorte für Demonstrationsanlagen, um Störungen durch variable Standortbedingungen zu minimieren.

2. **Aufbau des Boden- und Klimamonitorings:**

- Festlegung von mindestens vier Referenzstandorten pro Hektar innerhalb der APV-Anlage und auf der Kontrollflächen. Bei größeren oder heterogenen Flächen ist die Anzahl der Standorte zu erhöhen.
- An den Referenzstandorten werden Bodenprofilgruben angelegt und Bodenproben in feiner Auflösung (1 cm für Bodenphysik, 5 cm für Bodenchemie und -biologie) entnommen.
- Installation von Messinstrumenten für mikroklimatische und bodenklimatische Daten sowie mindestens zwei autonome Klima- und Wetterstationen, die innerhalb und außerhalb der APV-Anlage Daten sammeln.

Empfohlene Parameter für das Monitoring umfassen eine skalierbare Anzahl an Messpunkten je nach Anlagengröße und detaillierte Analysen zu bodenphysikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften. Dies ermöglicht eine umfassende Erfassung der Standortbedingungen und stellt die Vergleichbarkeit sicher.

Durch die Einhaltung der oben beschriebenen Schritte können positive sowie negative Veränderungen im Boden zuverlässig erfasst werden, wodurch die Datenbasis im Bereich Agri-Photovoltaik (APV) weiter gestärkt wird. Dies trägt zu präziseren Prognosen hinsichtlich der Standorttauglichkeit zukünftiger APV-Anlagen bei.

10.4) Wissenschaftliches Monitoring von Biodiversität

Die Integration von Photovoltaik in die Landwirtschaft (Agri-PV) bietet nicht nur die Möglichkeit zur Energieerzeugung, sondern stellt auch einen bedeutenden Beitrag zum Schutz und zur Förderung der biologischen Vielfalt dar. Obwohl der Einfluss von Agri-PV auf die Biodiversität noch umfassender untersucht werden muss, deuten zahlreiche Studien zu PV-Freiflächenanlagen darauf hin, dass Solarmodule unter geeigneten Bedingungen das Potenzial haben, die Artenvielfalt zu fördern, indem sie durch eine struktureichere Landschaftsgestaltung mehr Lebensräume für verschiedene Arten schaffen. Zu den strukturgebenden Maßnahmen, neben der Anlage selbst, gehören unter anderem Hecken mit gebietsheimischen Wildgehölzen, Ankerpflanzen und Blühstreifen aus gebietsheimischen Wildpflanzen (Bundesprogramm leben.natur.vielfalt, 2022). Die Ergebnisse der Zürcher Hochschule für Angewandte Wissenschaften im Auftrag des Bundesamts für Energie der Schweiz (Schlegel, 2021) unterstreichen die vielfältigen Möglichkeiten, die PV-FFA zur Förderung der Biodiversität bieten. Durch eine sorgfältige Planung und Gestaltung der Anlagen können Synergien zwischen Energieerzeugung und Naturschutz geschaffen werden.

So zeigt eine umfassende Studie von Sonne Sammeln (2022) an 75 Solarparks, dass sich der Artenreichtum in der Regel deutlich erhöht. Schlegel (2021) kommt zu dem Schluss, dass auf bis zu 95 % der Fläche einer PV-FFA die Biodiversität gefördert werden kann. Auch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V., 2019) bestätigt, dass die Umwandlung von Ackerland in Grünland unter einer PV-Anlage in der Regel zu einer Zunahme der Biodiversität führt.

Besonders hervorzuheben ist die positive Wirkung von PV-FFA auf die Insektenwelt. Untersuchungen von Raab (2015) und Parker & McQueen (2013) zeigen, dass auf PV-Flächen eine höhere Dichte an Bienen, Bestäubern und anderen Insektenarten wie Heuschrecken, Tagfaltern, Spinnen und Laufkäfern zu finden ist. Auch seltene und bedrohte Arten wie der Zahnflügel-Bläuling, der Kleine Schlehen-Zipfelfalter und der Lilagold-Feuerfalter können von den Lebensraumstrukturen einer PV-Anlage profitieren. Die Anlage von Hecken mit geeigneten Pflanzenarten wie Schwarzdorn, Rote Heckenkirsche, Kreuzdorn und Faulbaum kann diesen positiven Effekt weiter verstärken. Bedingt ist dies auf die Agri-PV, sofern sie naturnah umgesetzt wird, zu übertragen (siehe Anhang Naturnahe Gestaltung von Agri-PV-Anlagen: Zusätzliche Maßnahmen zum Schutz von Feldhamster und Vogelwelt). Solange unter Agri-Photovoltaikanlagen jedoch weiterhin Pestizide eingesetzt werden, bleibt eine signifikante Erhöhung der Vielfalt der Insekten selbst auf Blühstreifen schwer umsetzbar.

Des Weiteren können Solarparks, wenn sie artgerecht gestaltet sind, einen wertvollen Beitrag zum Schutz der biologischen Vielfalt leisten. Studien zeigen, dass Arten wie Hasen und Rehe diese Flächen nutzen und dass Solarparks mit biodiversitätsfördernden Elementen wichtige Lebensräume für eine Vielzahl von Tierarten darstellen (Herden et al., 2009; Günnewig et al., 2007). Durch die Schaffung von Lebensräumen und die Vernetzung von Schutzgebieten können PV-FFA dazu beitragen, den Rückgang der Biodiversität aufzuhalten und die Ökosystemleistungen zu stärken (Habitat-Richtlinie 92/43/EWG und Richtlinie 2009/147/EG; Semeraro et al., 2018).

Zusätzlich konnte nachgewiesen werden, dass PV-FFA einen wichtigen Beitrag zum Schutz von Vogelarten leisten. Studien zeigen, dass eine Vielzahl von Vogelarten, darunter Greifvögel, Offenlandarten und sogar gefährdete Arten wie Wachtel und Rebhuhn, PV-FFA als Lebensraum nutzen (Badelt, 2020; Peschel, 2010). Insbesondere die thermischen Aufwinde oberhalb der Anlagen machen PV-FFA für Greifvögel attraktiv (Dwyer et al., 2018).

Um diese Vielfalt weiter wissenschaftlich zu untersuchen, ist ein umfassendes Monitoring notwendig. Insbesondere Populationen und Arten von Insekten, Amphibien, Vögeln und Säugetieren sollten in Forschungsprojekten regelmäßig erfasst werden, beispielsweise durch Kartierungen. Für Flächen mit Photovoltaik auf Agrarflächen (FFPV) liegen bereits vielversprechende Forschungsergebnisse zur Förderung der Biodiversität vor, diese Forschung sollte nun innerhalb von Agri-PV Projekten repliziert werden. Ludzuweit et al. (2025) unter Zusammenarbeit mit Prof. K. Wydra beschrieb bereits, dass die Ökosystemdienstleistungen in APV-Anlagen ansteigen. Durch die Schaffung von Lebensräumen für eine Vielzahl von Arten

können Agri-PV Anlagen, insbesondere, wenn sie mit zusätzlichen Maßnahmen kombiniert werden, zukünftig einen wertvollen Beitrag zur Erhaltung der Ökosysteme leisten und gleichzeitig zur Energiewende beitragen.

12) Handlungsempfehlungen für verschiedene Akteur:innen zur Förderung von Agri-Photovoltaik

12.1) Für die Politik: Regelungen / Priorisierungen optimieren

- **Gesetzliche Rahmenbedingungen:** Die Bundes- und Landesregierung sollte klare, langfristige und unbürokratische Regelungen für APV-Anlagen schaffen, insbesondere hinsichtlich Förderungen und Ausschreibungen. Die Ergänzungen des EEGs durch das Solarpaket I sind gute erste Schritte, sie gehen aber noch nicht weit genug. Eine Priorisierung der Doppelnutzung landwirtschaftlicher Flächen für Energie- und Lebensmittelproduktion wäre dabei essentiell. Zudem sollte die Zahlung der Einspeisevergütung nicht von der Regierungskonstellation abhängen; dies würde Planungen für die Investor*innen /Landwirt*innen unmöglich machen.
- **Förderung der Innovation:** Weiteres Unterstützen von Forschung und Entwicklung im Bereich effizienter und nachhaltiger APV-Technologien, um den landwirtschaftlichen und energiewirtschaftlichen Nutzen weiter zu optimieren.
- **Verfahren beschleunigen:** Um den Ausbau von Agri-Photovoltaik zu beschleunigen, müssen Genehmigungsverfahren deutlich effizienter gestaltet, harmonisiert und standardisiert werden. Durch eine Standardisierung der Antragsunterlagen, gegebenenfalls erforderliche Umweltgutachten (Einzelfallbetrachtung), die Digitalisierung von Prozessen und eine klare Zuweisung von Zuständigkeiten können Genehmigungszeiten erheblich verkürzt werden. Dazu sollte das Bau- und Planungsrecht an die Anforderungen von APV-Projekten angepasst werden, um bürokratische Hürden abzubauen und die Investitionssicherheit zu erhöhen. Der Unterschied zwischen APV, d.h. auf zuvor und weiterhin landwirtschaftlich bewirtschafteten Flächen, und FFPV sollte im Genehmigungsverfahren berücksichtigt, und die APV als Sonderregelung für die Landwirtschaft privilegiert werden.

12.2) Für die Wirtschaft: Anreize schaffen

- **Investitionsanreize:** Finanzielle Anreize wie Steuererleichterungen oder Zuschüsse für Unternehmen, die in APV-Projekte investieren, sollten ausgeweitet werden. Die derzeitige, zusätzliche Einspeisevergütung von 2,5 ct pro kWh reicht insbesondere für Anlagen mit hohen Vorabkosten, wie hoch aufgeständerte Systeme, nicht aus. Diese Systeme bieten, wie bereits dargelegt, die besten Synergien zwischen Landwirtschaft und Energieproduktion, erfordern jedoch aufgrund der höheren Aufbaukosten längere Amortisationszeiten. Dies erschwert die Einführung solcher Systeme. Eine gezielte Erhöhung der Förderung sollte die wirtschaftliche Attraktivität steigern und die Kooperation zwischen Landwirtschaft und Energiewirtschaft fördern.
- **Technologieförderung:** Unterstützen von Unternehmen bei der Entwicklung und Vermarktung innovativer Technologien zur effizienteren Nutzung von APV,

insbesondere bei der Kombination mit neuen landwirtschaftlichen Bewirtschaftungskonzepten. Dies könnte beispielsweise die Förderung von elektrisch betriebenen Traktoren oder kleinerem Gerät beinhalten, wenn die landwirtschaftlichen Betriebe auf die Bewirtschaftung unter Agri-PV umstellen.

- **Kooperationsmodelle fördern:** Entwickeln von Modellen für finanzielle Kooperationen zwischen Energie- und Agrarwirtschaft, um Synergieeffekte in der Produktion und Nutzung von Energie und Agrarprodukten zu erhöhen.

12.3) Für Investoren und Anlagenbauer: Hürden, Potentiale und Vorgehen darstellen

- **Hürden transparent machen:** Identifizieren der regulatorischen, technischen und finanziellen Hürden für Landwirt:innen und Anlagenbauer:innen, die bei der Investition in APV-Projekte bestehen, und die Entwicklung von Lösungen, gemeinsam mit Politik und Wirtschaft, um diese zu überwinden.
- **Langfristige Potentiale aufzeigen:** Effektiver Wissenstransfer über wirtschaftlichen und ökologischen Potenzialen von APV-Anlagen gegenüber Landwirt:innen, Politik und Bevölkerung, insbesondere die Möglichkeit, landwirtschaftliche Erträge zu steigern und zu stabilisieren sowie gleichzeitig nachhaltige Energie zu erzeugen und den Klimawandel zu begrenzen.
- **Investitionsstrategien entwickeln:** Erstellen einer detaillierten Roadmap für Investitionen in APV, unter Berücksichtigung von Finanzierungsmöglichkeiten, Förderprogrammen und technischen Entwicklungen.

12.4) Für Gemeinden: Akzeptanzsteigerungsmaßnahmen und Partizipationsmöglichkeiten entwickeln

- **Akzeptanzsteigerungsmaßnahmen** entwickeln: Gemeinden sollten aktiv in die Planung und Umsetzung von APV-Anlagen einbezogen werden. Informationsveranstaltungen mit Gemeinderäten und Bürgermeister:innen, Bürgerdialoge und transparente Kommunikation sind zentrale Maßnahmen, um die Akzeptanz in der Bevölkerung zu erhöhen.
- **Untersuchung von Partizipationsmöglichkeiten:** Es sollten Modelle zur Bürgerbeteiligung entwickelt werden, beispielsweise durch lokale Genossenschaften oder Bürgerfonds, die es der Bevölkerung ermöglichen, finanziell am Erfolg von APV-Projekten teilzuhaben.
- **Integration der Gesellschaft:** Die Einbindung der lokalen Bevölkerung in die Planung, Gestaltung und Nutzung von APV-Anlagen trägt dazu bei, Widerstände zu minimieren und eine breitere gesellschaftliche Unterstützung zu gewinnen.

12.5) Für Behörden: Bauleitplanung, Umweltplanung, Genehmigungsplanung

- **Anpassung der Ausgleichsbilanzierung:** Anpassung von Eingriffs- und Ausgleichsbilanzierung, um die Doppelnutzung von Flächen für Landwirtschaft und Energieerzeugung stärker zu fördern. Die Kombination von Nutzungen, wie Agri-Photovoltaik, sollte als vorteilhaft gegenüber einer Mononutzung bewertet werden, und könnte selbst als eine Ausgleichsmaßnahme angesehen werden.
- **Genehmigungsprozesse vereinfachen:** Klare und einfache Leitlinien für Genehmigungsverfahren für den Bau und Betrieb von APV-Anlagen schaffen. Das Setzen auf standardisierte Verfahren kann so Zeit- und Kosteneffizienz erhöhen.
- **Akzeptanzmaßnahmen umsetzen:** Durchführung von Aufklärungskampagnen und Schulungen, um die Bevölkerung über die Vorteile von APV zu informieren und deren Akzeptanz zu fördern.

12.6) Für Landwirt:innen / Landwirtschaft: Hürden, Potentiale und Geschäftsmodelle aufzeigen

- **Hürden identifizieren und Lösungen anbieten:** Aufzeigen der rechtlichen, technischen und finanziellen Hürden bei der Installation und dem Betrieb von APV-Anlagen.
- **Darstellung von Hürden und Potenzialen:** Landwirt:innen sollten umfassend über die Chancen und Herausforderungen von APV-Anlagen informiert werden, insbesondere in Bezug auf die Auswirkungen auf den landwirtschaftlichen Ertrag, Investitionskosten und mögliche Ertragsausfälle.
- **Geschäftsmodelle erläutern:** Präsentieren von verschiedenen Geschäftsmodellen, die Landwirt:innen eine zusätzliche Einnahmequelle bieten. Erläutern der langfristigen Vorteile für den Betrieb, etwa durch geringere Energiekosten und gesteigerte Resilienz in Dürrejahre.
- **Lösungsmöglichkeiten und Geschäftsmodelle:** Es sollten konkrete Geschäftsmodelle für Landwirt:innen entwickelt werden, die zeigen, wie APV als zusätzliche Einkommensquelle genutzt werden kann. Dazu gehört auch die Beratung zu Fördermöglichkeiten, Eigenverbrauchskonzepten und Vertragsmodellen mit Investoren.
- **Nachhaltige Landwirtschaft fördern:** Betonung, wie APV zur Klimaanpassung und zur nachhaltigen Landwirtschaft beitragen kann, insbesondere durch verbesserten Schutz der Nutzpflanzen und die Nutzung erneuerbarer Energien vor Ort.

13) Quellenverzeichnis

- Adeh, E. H., Selker, J. S., & Higgins, C. W. (2018). Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency. *PLOS ONE*, 13(11), e0203256. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256>
- Agrotel Gitterträgerhallen. (2024). *Agrotel Gitterträgerhallen, Stahlhallen mit großer Spannweite*. Agrotel. <https://agrotel.eu/produkt/gittertraegerhalle/>
- Akhter, N., Rahman, M. M., Hasanuzzaman, M., & Nahar, K. (2009). Dry matter partitioning in garden pea (*Pisum sativum* L.) as influenced by different light levels. *Academic Journal of Plant Sciences* 2(4) <https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=982839ede2658f2f31eccf6e015f14e9844981bc>
- AL-agele, H. A., Proctor, K., Murthy, G., & Higgins, C. (2021). A case study of tomato (*Solanum lycopersicon* var. *Legend*) production and water productivity in agrivoltaic systems. *Sustainability*, 13(5), Article 5. <https://doi.org/10.3390/su13052850>
- APV RESOLA. (2024). *Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende*. Fraunhofer ISE. <https://agri-pv.org/de/>
- Arenas-Corraliza, M. G., Rolo, V., López-Díaz, M. L., & Moreno, G. (2019). Wheat and barley can increase grain yield in shade through acclimation of physiological and morphological traits in Mediterranean conditions. *Scientific Reports*, 9(1), 9547. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-46027-9>
- Axial Structural. (2024). *Design, Manufacture & Installation of utility-Scale Solar Mounting Systems*. Axial Structural. <https://www.axialstructural.com/?lang=en>
- Badelt, O. (2020). *Integration von Solarenergie in die niedersächsische Energielandschaft (INSIDE) – Institut für Umweltplanung*. Leibniz Universität Hannover.

[https://www.umwelt.uni-hannover.de/de/matthies/publikationsliste/detailseite/fis-details/publ/a140371d-802c-4d41-ad92-](https://www.umwelt.uni-hannover.de/de/matthies/publikationsliste/detailseite/fis-details/publ/a140371d-802c-4d41-ad92-63d956b0afbc?cHash=8986c9bdaac1fca257906eb81e5a2eb6)

[63d956b0afbc?cHash=8986c9bdaac1fca257906eb81e5a2eb6](https://www.umwelt.uni-hannover.de/de/matthies/publikationsliste/detailseite/fis-details/publ/a140371d-802c-4d41-ad92-63d956b0afbc?cHash=8986c9bdaac1fca257906eb81e5a2eb6)

Bazzaz, F. A., & Harper, J. L. (1977). Demographic analysis of the growth of *Linum usitatissimum*. *New Phytologist*, 78(1), 193–208. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1977.tb01558.x>

Beisecker, D. (2020). *Veränderungen der Wasseraufnahme und -speicherung landwirtschaftlicher Böden und Auswirkungen auf das Überflutungsrisiko durch zunehmende Stark- und Dauerregenereignisse*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/veraenderungen-der-wasseraufnahme-speicherung>

Blanchet, G., Barkaoui, K., Bradley, M., Dupraz, C., & Gosme, M. (2022). Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea grown in a 25-year-old walnut-based alley cropping system. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(5), 583–598. <https://doi.org/10.1111/jac.12488>

Bullock, D. G. (1992). Crop rotation. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 11(4), 309–326. <https://doi.org/10.1080/07352689209382349>

Bundesprogramm leben.natur.vielfalt. (2022). *Förderung der Artenvielfalt in Öko-Erwerbsobstanlagen*. https://biodiv-oekoobstbau.de/wp-content/uploads/2023/01/Handout_Biodiversitaetsmassnahmen_DIGI.pdf

Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V. (2019). *Solarparks—Bundesverband Neue Energiewirtschaft e.V.* <https://www.bne-online.de/themen/solarparks/>

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung. (2024). *Präzisionslandwirtschaft*. Praxis-Agrar. <https://www.praxis-agrar.de/service/infografiken/praezisionslandwirtschaft>

- Busch, C., & Wydra, K. (2023). Life cycle assessment of an agrivoltaic system with conventional potato production. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 15(4), 043501. <https://doi.org/10.1063/5.0156779>
- Cengiz, M., Mamis, M., & Yurci, Y. (2016). Cost comparison of constant and tracking system PV panels with stirling motor-operated systems. *Bitlis Eren University Journal of Science and Technology*, 6. <https://doi.org/10.17678/beujst.92728>
- Chemigation | NDSU Agriculture. (2021). *Chemigation | NDSU Agriculture*. <https://www.ndsu.edu/agriculture/ag-hub/ag-topics/crop-production/irrigation-tiling-drainage/chemigation>
- Cypher, B. L., Boroski, B. B., Burton, R. K., Meade, D. E., Phillips, S. E., Leitner, P., Kelly, E. C., Westall, T. L., & Dart, J. (2021). Photovoltaic solar farms in California: Can we have renewable electricity and our species, too? *California Fish and Wildlife Journal*, 107(3), 231–248. <https://doi.org/10.51492/cfwj.hwisi.6>
- Demmel, M., & Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising. (2022). *DLG-Merkblatt 467*. https://www.dlg.org/fileadmin/downloads/Merkblaetter/dlg-merkblatt_467.pdf
- DIN - Deutsches Institut für Normung. (2021). *din-de*. <https://www.din.de/de>
- DLG-Fachbereich Landtechnik. (1996). *Trocknung von Getreide, Körnermais und Raps im landwirtschaftlichen Betrieb*. <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1537487/1537487.pdf>
- Dodd, M., McGowan, A., Power, I., & Thorrold, B. (2005). Effects of variation in shade level, shade duration and light quality on perennial pastures. *New Zealand Journal of Agricultural Research - N Z J AGR RES*, 48, 531–543. <https://doi.org/10.1080/00288233.2005.9513686>

Don, A. (2014). *Thünen: Tiefpflügen für den Klimaschutz?*

<https://www.thuenen.de/de/newsroom/presse/pressearchiv/pressemitteilungen-2014/tiefpfluegen-fuer-den-klimaschutz>

Dupraz, C. (2023). Assessment of the ground coverage ratio of agrivoltaic systems as a proxy for potential crop productivity. *Agroforestry Systems*.

<https://doi.org/10.1007/s10457-023-00906-3>

Dwyer, J. F., Landon, M. A., & Mojica, E. K. (2018). Impact of Renewable Energy Sources on

Birds of Prey. In J. H. Sarasola, J. M. Grande, & J. J. Negro (Hrsg.), *Birds of Prey:*

Biology and conservation in the XXI century (S. 303–321). Springer International

Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-73745-4_13

Ebert, T., & Müller, C. (2011). Sind Schadstoffe in Photovoltaik-Freiflächenanlagen eine

Gefahr für den Boden? *Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft*.

Edouard, S., Combes, D., Van Iseghem, M., Tin, M., & Escobar-Gutiérrez, A. (2023). Increasing

land productivity with agriphotovoltaics: Application to an alfalfa field. *Applied*

Energy, 329, 120207. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120207>

Ernte in Thüringen 2023—Witterung, Erträge und Preise. (2023).

Feistel, U., Kettner, S., Ebermann, J., Müller, F., & Werisch, S. (2022). *Wie PV-*

Freiflächenanlagen den Bodenwasserhaushalt verändern – Begleitforschung im

größten Solarpark Deutschlands. In: DWA, Fachgemeinschaft Hydrologische

Wissenschaften (Hg.): *Im Wandel - Klima, Wasser und Gesellschaft: Prozesse,*

Methoden und Kommunikation. Beiträge zum Tag der Hydrologie am 22./23. März

2022 in München. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung 43.22. Hennef:

DWA, Fachgemeinschaft Hydrologische Wissenschaften. S. 43-52.

<https://henry.baw.de/server/api/core/bitstreams/74a6f364-084a-4c67-99e7-ba73a1ea6311/content>

Fachkräftemangel in der Realität deutlich höher als in der Statistik. (2023, Dezember 13). top agrar online. <https://www.topagrar.com/betriebsleitung/news/tatsaechlich-kein-fachkraeftemangel-in-der-landwirtschaft-13550028.html>

Fluhr-Meyer, G., & Adelman, W. (2020). Blühstreifen und Pestizide – Falle oder Lebensraum? *Land schafft Vielfalt*, ANLiegen Natur 42(2): 15-26.
https://www.anl.bayern.de/publikationen/anliegen/doc/an42205fluhr_meyer_et_al_2020_bluehstreifen_pestizide.pdf

Fraunhofer ISE. (2024). *Aktuelle Fakten zur Photovoltaik in Deutschland—Fraunhofer ISE.* Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE.
<https://www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/studien/aktuelle-fakten-zur-photovoltaik-in-deutschland.html>

Fritz, B., Horváth, G., Hünig, R., Pereszlényi, Á., Egri, Á., Guttman, M., Schneider, M., Lemmer, U., Kriska, G., & Gomard, G. (2020). Bioreplicated coatings for photovoltaic solar panels nearly eliminate light pollution that harms polarotactic insects. *PLOS ONE*, 15(12), e0243296. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0243296>

Garrod, A., Hussain, S. N., & Ghosh, A. (2024). The technical and economic potential for crop based agrivoltaics in the United Kingdom. *Solar Energy*, 277, 112744.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2024.112744>

Gessert, S. (2023). *Ökologische Flächenaufwertung im Einvernehmen mit nachhaltiger Stromproduktion durch Photovoltaik-Freiflächenanlagen.* Masterarbeit. Fachhochschule Erfurt.

- Gorjian, S., Bousi, E., Özdemir, Ö. E., Trommsdorff, M., Kumar, N. M., Anand, A., Kant, K., & Chopra, S. S. (2022). Progress and challenges of crop production and electricity generation in agrivoltaic systems using semi-transparent photovoltaic technology. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112126.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112126>
- Günnewig. (2007). *Leitfaden zur Berücksichtigung von Umweltbelangen bei der Planung von PV-Freiflächenanlagen*. ARGE Monitoring PV Anlagen
https://www.bauberufe.eu/images/doks/pv_leitfaden.pdf
- Harrison, C., & Lloyd, H. (2016). *Evidence review of the impact of solar farms on birds, bats and general ecology*. ResearchGate. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24726.96325>
- Herden, C., Rassmus, J., & Gharadjedaghi, B. (2009). *Naturschutzfachliche Bewertungsmethoden von Freilandphotovoltaikanlagen*. Bundesamt für Naturschutz.
<https://www.bfn.de/sites/default/files/BfN/service/Dokumente/skripten/skript247.pdf>
- Hietel, Dr. E. (2021). *Leitfaden für naturverträgliche und biodiversitätsfreundliche Solarparks*. TH Bingen. https://www.th-bingen.de/fileadmin/projekte/Solarparks_Biodiversitaet/Leitfaden_Massnahmensteckbriefe.pdf
- Hörnle, O. (2022). *DURCHFÜHRBARKEITSSTUDIE Zur Ermittlung möglicher Forschung- und Demonstrationsfelder für Agri-Photovoltaik in Baden-Württemberg*. Fraunhofer ISE. <https://agri-pv.org/dokumente/49/Durchf%C3%BChrbarkeitsstudie.pdf>
- India Meteorological Department. (2024). *Rainfall: Cumulative: Rajasthan: Jodhpur: Actual | Economic Indicators | CEIC*. Rainfall: Cumulative: Rajasthan: Jodhpur: Actual |

Economic Indicators | CEIC. <https://www.ceicdata.com/en/india/rainfall-by-district-cumulative/rainfall-cumulative-rajasthan-jodhpur-actual>

Jarčuška, B., Gálffyová, M., Schnürmacher, R., Baláž, M., Mišík, M., Repel, M., Fulín, M., Kerestúr, D., Lackovičová, Z., Mojžiš, M., Zámečník, M., Kaňuch, P., & Krištín, A. (2024). Solar parks can enhance bird diversity in agricultural landscape. *Journal of Environmental Management*, 351, 119902.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119902>

Kärcher GmbH. (2024). *Photovoltaik: Reinigung von Solarzellen leicht gemacht* | Kärcher | Kärcher. <https://www.kaercher.com/de/professional/know-how/solar-und-photovoltaikanlage-reinigen.html>

Kellner, T. (2022). *Auswirkungen auf Mikroklima und landwirtschaftliche Erträge*. Klatt, P. (2022, September 26). *PFAS und die Erneuerbaren*. PFAS Dilemma. <https://pfas-dilemma.info/aktuelles/49-pfas-und-die-erneuerbaren>

Laub, M., Pataczek, L., Feuerbacher, A., Zikeli, S., & Högy, P. (2021). Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems. A meta-analysis. *agriRxiv*, 2021, 20210479141. <https://doi.org/10.31220/agriRxiv.2021.00099>

Liatukienė, A., Skuodienė, R., Norkevičienė, E., Tamm, S., Pechter, P., & Petrauskas, G. (2024). Evaluation and selection of alfalfa genotypes for tolerance to aluminium toxic stress. *Frontiers in Plant Science*, 15. <https://doi.org/10.3389/fpls.2024.1437993>

Lindström, L. I., Pellegrini, C. N., Aguirrezábal, L. A. N., & Hernández, L. F. (2006). Growth and development of sunflower fruits under shade during pre and early post-anthesis period. *Field Crops Research*, 96(1), 151–159. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2005.06.006>

Ludzuweit, A. G., Paterson, J., Wydra, K., Pump, C., Müller, K., & Miller, Y. (2025).

Quantifying the impact of habitat-enhancing strategies on the ecosystem services in agrivoltaic systems. *Journal Renewable and Sustainable Energy Reviews*. In press. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4965801>

Mantino, A., Tozzini, C., Bonari, E., Mele, M., & Ragaglini, G. (2021). Competition for light affects alfalfa biomass production more than its nutritive value in an olive-based alley-cropping system. *Forests*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/f12020233>

Mehrfährige Blühstreifen—NABU BW. (2024). NABU - Naturschutzbund Deutschland e.V. <https://baden-wuerttemberg.nabu.de/natur-und-landschaft/aktionen-und-projekte/refugialflaechen-fuer-die-artenvielfalt/refugialflaechen/34358.html>

Moore-O’Leary, K. A., Hernandez, R. R., Johnston, D. S., Abella, S. R., Tanner, K. E., Swanson, A. C., Kreitler, J., & Lovich, J. E. (2017). Sustainability of utility-scale solar energy – critical ecological concepts. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 15(7), 385–394. <https://doi.org/10.1002/fee.1517>

NABU. (2023).

https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/solarenergie/230725-nabu-hintergrundpapier_agri-photovoltaik.pdf.
https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/energie/solarenergie/230725-nabu-hintergrundpapier_agri-photovoltaik.pdf

Nasrollahzadeh, S., Ghassemi-Golezani, K., Javanshir, A., Valizadeh, M., & Shakiba, M. R. (2007). Effects of shade stress on ground cover and grain yield of faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Food Agriculture and Environment*, 5.

Neidlein, N. (2020). *Himbeeren unter Solarmodulen statt unter Folientunneln*.

<https://www.energiezukunft.eu/erneuerbare-energien/solarenergie/himbeeren-unter-solarmodulen-statt-unter-folientunneln>

Pang, K., Van Sambeek, J. W., Navarrete-Tindall, N. E., Lin, C.-H., Jose, S., & Garrett, H. E.

(2019). Responses of legumes and grasses to non-, moderate, and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yield and its species-level plasticity. *Agroforestry Systems*, 93(1), 11–24. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0067-8>

Parker, G. E., & McQueen, C. (2013). *Can Solar Farms Deliver Significant Benefits for*

Biodiversity? Preliminary Study July-August 2013. Wychwood Biodiversity.

<https://wychwoodbiodiversity.co.uk/wp-content/uploads/2021/11/Solar-and-Biodiversity-Report-Parker-McQueen-2013d.pdf>

Pataczek, L., Weselek, A., Bauerle, A., Högy, P., Lewandowski, I., Zikeli, S., & Schweiger, A.

(2023). Agrivoltaics mitigate drought effects in winter wheat. *Physiologia Plantarum*, 175(6), e14081. <https://doi.org/10.1111/ppl.14081>

Peschel, T. (2010). Agentur für Erneuerbare Energien e. V. *Solarparks – Chancen für die*

Biodiversität Erfahrungsbericht zur biologischen Vielfalt in und um Photovoltaik-Freiflächenanlagen. Renew's Spezial 45.

https://unendlich-viel-energie.de/media/file/146.45_Renews_Spezial_Biodiversitaet-in-Solarparks_online.pdf

Raab, B. (2015). Erneuerbare Energien und Naturschutz – Solarparks können einen Beitrag

zur Stabilisierung der biologischen Vielfalt leisten. *ANLIEGEN NATUR* 37(1), 2015: 67–76

https://www.anl.bayern.de/publikationen/anliegen/doc/an37106raab_2015_solarfelder.pdf

Rößner, J.-V. (2022). Rainwater Management in Agrivoltaic Systems. *Research and Development Potential. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion*, 996–998.

Santra, P., Singh, R., Meena, H. M., Kumawat, R., Mishra, D., Machiwal, D., Dayal, D., Jain, D., & Yadav, O. P. (2020). *Agri-Voltaic System for Crop Production and Electricity Generation from a Single Land Unit* (S. 45–56). https://doi.org/10.1007/978-981-15-2666-4_6

Schlegel, J. (2021). *Auswirkungen von Freiflächen-Photovoltaikanlagen auf Biodiversität und Umwelt. Literaturstudie*. <https://doi.org/10.21256/zhaw-23607>

Semeraro, T., Pomes, A., Del Giudice, C., Negro, D., & Aretano, R. (2018). Planning ground based utility scale solar energy as green infrastructure to enhance ecosystem services. *Energy Policy*, 117, 218–227. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2018.01.050>

SENS Energy. (2024). *8 Fakten über Freiflächen Photovoltaik*. <https://www.sens-energy.com/de/news/8-fakten-ueber-freiflaechen-photovoltaik/>

Singh, D. P., Banwait, S. S., Dhami, S. S., Goyal, D. (2020). Performance Comparison of Fixed and Tracking Type Solar Plants. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 9(9), 612–620. <https://doi.org/10.35940/ijitee.I7284.079920>

„Smart Farming bis zum Ladenregal“ *Kyffhäuser Nachrichten*. (2024).

https://www.nordthueringen.de/news/news_lang.php?ArtNr=354514

Sonne Sammeln. (2022). *Sonne Sammeln*. <https://sonne-sammeln.de/>

SolarInput. (2024). SolarInput e.V. *Italien erlaubt nur noch Agri-PV-Anlagen auf landwirtschaftlichen Flächen – SolarInput*. <https://solarinput.de/italien-erlaubt-nur-noch-agri-pv-anlagen-auf-landwirtschaftlichen-flaechen/>

Statistisches Bundesamt. (2023). *Stromerzeugung 2023: 56 % aus erneuerbaren Energieträgern*. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/03/PD24_087_43312.html

Statistisches Bundesamt. (2024). *Im Jahr 2022 wurden 554 000 Hektar landwirtschaftlich genutzte Freilandfläche bewässert*. Statistisches Bundesamt. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/05/PD24_186_41.html

Stiftung Naturschutz Thüringen. (2023). *Feldhamster FREUND. Den Feldhamster retten— Jetzt! KULAP-Maßnahmen: Förderperiode 2023-2027*. https://www.feldhamster-thueringen.de/fileadmin/Medien/Feldhamster-Thueringen/KULAP_Broschuere.pdf

Thünen: LAWAMAD – *Landwirtschaftliches Wassermanagement Deutschland (Teilprojekt C)*. (2022). <https://www.thuenen.de/de/institutsuebergreifende-projekte/lawamad-landwirtschaftliches-wassermanagement-deutschland-teilprojekt-c>

Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum. (2023). *Agrarmeteorologie-TH\Wetterdaten\Stationskarte*. <https://www.wetter-th.de/Agrarmeteorologie-TH/Wetterdaten/Stationskarte>

Thüringer Landesamtes für Statistik. (2023). *LgF | Statistikportal.de*. Statistische Ämter des Bundes und der Länder | Gemeinsames Statistikportal. <https://www.statistikportal.de/de/ugrdl/ergebnisse/flaeche-und-raum/lgf>

TLUBN, T. L. für U., Bergbau und. (2020). *Zukünftiges Klima | Thüringer Landesamt für Umwelt, Bergbau und Naturschutz.*

<https://tlubn.thueringen.de/klima/entwicklung/zukunft>

Towner, E., Karas, T., Janski, J., Macknick, J., & Ravi, S. (2022). *Managed sheep grazing can improve soil quality and carbon sequestration at solar photovoltaic sites.*

<https://doi.org/10.34944/dspace/7233>

Trommsdorff, M., Hopf, M., Hörnle, O., Berwind, M., Schindele, S., & Wydra, K. (2023). Can synergies in agriculture through an integration of solar energy reduce the cost of agrivoltaics? An economic analysis in apple farming. *Applied Energy*, 350, 121619.

<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.121619>

Umweltbundesamt. (2023). *Photovoltaik-Freiflächenanlagen* [Text]. Umweltbundesamt;

Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-](https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik/photovoltaik-freiflaechenanlagen)

[energie/erneuerbare-energien/photovoltaik/photovoltaik-freiflaechenanlagen](https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/erneuerbare-energien/photovoltaik/photovoltaik-freiflaechenanlagen)

Vandest, E., & Hemetsberger, W. (2021). *Agrisolar, Best Practices Guidelines.*

<https://solargrazing.org/wp-content/uploads/2021/06/SPE-Agrisolar-Best-Practices-Guidelines.pdf>

Varella, A. C., Moot, D., Pollock, K., Peri, P., & Lucas, R. (2011). Do light and alfalfa responses to cloth and slatted shade represent those measured under an agroforestry system?

Agroforestry Systems, 81, 157–173. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9319-6>

Vollmer, V. L. (2022). *Agri-Photovoltaik aktueller Forschungs- und Technikstand, sowie*

fallspezifische Wirtschaftlichkeitsbetrachtung. Masterarbeit. Fachhochschule Erfurt.

[https://www.fh-](https://www.fh-erfurt.de/fileadmin/Dokumente/Personen/LGF/Wydra/MA_Thesis_Vera_Vollmer.pdf)

[erfurt.de/fileadmin/Dokumente/Personen/LGF/Wydra/MA_Thesis_Vera_Vollmer.pdf](https://www.fh-erfurt.de/fileadmin/Dokumente/Personen/LGF/Wydra/MA_Thesis_Vera_Vollmer.pdf)

- Wydra, K., Vollmer, V., Schmidt, S., Prichta, S., Kunze, R., & Aulich, H. (2022). *Potential der Agri-Photovoltaik in Thüringen*. Gefördert durch Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz. https://solarinput.de/wp-content/uploads/2022/05/APV-Studie_19052022_Final.pdf
- Yanagisawa, Y. kio, & Yanagisawa, Y. ki. (1964). Influence of some environmental conditions upon the growth and development of the flax plant, *Linum usitatissimum* L. *Proceedings Crop Science Society Jap*, 32(3), Article 3.
- Yeligeti, M., Hu, W., Scholz, Y., Stegen, R., & Krbek, K. von. (2023). Cropland and rooftops: The global undertapped potential for solar photovoltaics. *Environmental Research Letters*, 18(5), 054027. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/accc47>
- Zabel, F. (2022). *Solarenergie wildtierfreundlich planen Empfehlungen für Freiflächenphotovoltaikanlagen* [Broschüre]. Landesjagdverband Schleswig-Holstein e.V. https://ljv-sh.de/wp-content/uploads/LJV_SH_Solarenergie-wildtierfreundlich-planen.pdf



14) Anhang des Gesamtkonzeptes „Agri-PVThue“

Wissenschaftliche Konzepte zur Umsetzung einer Agri-PV Anlage in Thüringen

- a) Basiskonzept für die Bewirtschaftung einer Agri-PV Anlage durch das Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR)
- b) Maximalkonzept für das Vorhaben: „Agri-PVThue - Innovative Konzepte zum Schutz der Pflanzenkulturen bei gleichzeitiger Stromerzeugung auf der Ackerfläche in Thüringen: Agri-Photovoltaik“
- c) Gutachten zur Eignung von Ackerkulturen in Agri-Photovoltaik Anlagen
- d) Wassermanagement - Agri-PVThue Regenwassermanagement im Kontext von Agri-Photovoltaik (APV) Anlagen in Thüringen
- e) Boden- und Klimamonitoring im Kontext von Agriphotovoltaik (APV) Anlagen
- f) Naturnahe Gestaltung von Agri-PV-Anlagen: Zusätzliche Maßnahmen zum Schutz von Feldhamster und Vogelwelt
- g) Stellungnahme des Landschaftspflegeverbandes Mittelthüringen
- h) Leistungsportfolio MFPA

Kontakt: Dr. Hubert Aulich, SolarInput e.V.

E-Mail: h.aulich@solarinput.de

Gustav-Tauschek-Str. 2

99099 Erfurt

Tel.: 0172 7928935

Web: www.solarinput.de



Ministerium
für Infrastruktur
und Landwirtschaft

Basiskonzept für die Bewirtschaftung einer Agri-PV Anlage durch das Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR)

Marie-Luise Sturm (TLLLR), Kerstin Laue (TLLLR), Kerstin Wydra (FH Erfurt), Janina Happ (SolarInput e.V.)

Ziel der Agri-PVThue Demonstrationsanlage ist es, wissenschaftlich fundierte Erkenntnisse zur Bewirtschaftung von Agrarflächen unter einer Agri-PV-Anlage (Kategorie 1) in einer mitteldeutschen Trockenregion Thüringens zu gewinnen. Im Zentrum der Untersuchungen stehen die Auswirkungen von Schattenwurf und verändertem Wasserhaushalt, verursacht durch die Agri-PV, auf den Anbau gängiger Kulturpflanzen in Mitteldeutschland. Das Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR) Ref. 36, TLPVG soll innerhalb des Agri-PVThue Konzeptes unter Berücksichtigung der vorhandenen Maschinen und Personalkapazitäten die konventionelle Bewirtschaftung durchführen. Ergänzend werden Handelsanalysen durchgeführt.

Eine Auswahl der im regulären Betrieb angebauten Ackerkulturen sollen unter der Agri-PV-Anlage und auf einer Referenzfläche getestet werden. In Zusammenarbeit mit der Fachhochschule Erfurt (Prof. K. Wydra) wurde die Schattentoleranz verschiedener etablierter Kulturen in den derzeitigen Fruchtfolgen des TLPVG evaluiert, um eine optimale Auswahl der Versuchspflanzen zu gewährleisten. Für besonders schattenempfindliche Kulturen sind max. 1-3 Anbauversuche geplant. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es aufgrund des Schattenwurfs zu Ertragsverlusten kommen kann.

Anti-Tracking-Systeme könnten das Potenzial von Kulturen, die unter Verschattungsbedingungen weniger geeignet sind, deutlich erhöhen, indem sie die Photosynthetisch Aktive Strahlung (PAR) während kritischer Wachstumsphasen optimieren. Daher soll zusätzlich untersucht werden, inwieweit Anti-Tracking das Potenzial schattenempfindlicher Ackerkulturen steigern könnte. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden dazu beitragen, die Möglichkeiten und Grenzen von Agri-PV in der Region genauer zu bestimmen. Obwohl das Potenzial vielversprechend ist, fehlen derzeit noch ausreichend wissenschaftliche Daten, um definitive Aussagen treffen zu können.

Ertragsgewinne und -verluste unter der Agri-PV Anlage sollen daher transparent dokumentiert werden, in die Gesamtauswertung einfließen und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Ein Vergleich mit internationalen Studien ermöglicht es, die allgemeine Aussagekraft der Ergebnisse zu stärken.

1. Auflistung Kulturen zu Versuchen unter Agri-PV unter Bewirtschaftung des TLPVG

Kultur im Anbau des TLPVG	Abkürzung	Eignung unter APV	Quelle
Winterweizen	WW	<i>geeignet</i>	Skundelny und Zapfe (2024), Yeligeti et al. (2023), Dupraz (2023), Garrod et al. (2024), Wydra et al. (2022)
Wintergerste	WG	<i>geeignet</i>	Skundelny und Zapfe (2024), Yeligeti et al. (2023)
Sommergerste	SG	<i>geeignet</i>	Arenas-Corraliza et al. (2019), Yeligeti et al. (2023) Wydra et al. (2022)

<i>Hafer</i>		<i>geeignet</i>	Skundelny und Zapfe (2024), Garrod et al. (2024)
<i>Luzerne</i>		<i>geeignet</i>	Varella et al. (2011), Towner et al. (2022), Edouard et al. (2023), Zhang et al. (2024)
Ackerfutter		<i>geeignet</i>	Towner et al. (2022), Pang et al. (2017), Laub et al. (2022), Wydra et al. (2022)
<i>Roggen</i>		<i>geeignet</i>	Yeligeti et al. (2023), Wydra et al. (2022)
<i>Dinkel</i>		<i>geeignet</i>	Skundelny und Zapfe (2024)
<i>Winterraps</i>	Raps	<i>Bedingt geeignet</i>	Yeligeti et al. (2023), Garrod et al. (2024), Wydra et al. (2022)
<i>Sojabohne</i>	Soja	<i>Bedingt geeignet</i>	Yeligeti et al. (2023), Garrod et al. (2024)
<i>Zuckerrübe</i>		<i>Bedingt geeignet</i>	Yeligeti et al. (2023), Garrod et al. (2024), Wydra et al. (2022)
<i>Ackerbohne</i>	AB	<i>Bedingt geeignet</i>	Garrod et al. (2024), Nasrullahzadeh et al. (2007), Wydra et al. (2022)
<i>Mais</i>		<i>Bedingt geeignet</i>	Skundelny und Zapfe (2024), Yeligeti et al. (2023), Dupraz (2023), Garrod et al. (2024), Wydra et al. (2022)
<i>Weißer Lupine</i>	Lup	<i>Eher nicht geeignet</i>	Yeligeti et al. (2023), Mantino et al. (2021),
<i>Sonnenblume</i>	SBI	<i>Eher nicht geeignet</i>	Yeligeti et al. (2023), Cantagallo et al. (2004), Lindström et al. (2006), Wydra et al. (2022)
<i>Erbse</i>		<i>Eher nicht geeignet</i>	Yeligeti et al. (2023), Blanchet et al. (2022), Akhter et al. (2009), Wydra et al. (2022)
<i>Öllein</i>		<i>Keine aktuellen Daten</i>	Bazzaz und Harper (1977), Yanagisawa (1964), Wydra et al. (2022)

2. Personalkapazitäten

6 Festangestellte + 1 Pflanzenbauleiter für die Bewirtschaftung von 1.800 ha an 3 Standorten.

3. Vorhandene Maschinen

Gerät	Anwendungsbereich	Fabrikat / Arbeitsbreite
Zinkensämaschine	Aussaat im Mulchsaatverfahren	Köckerling Ultima CS, 6 m
Direktsämaschine	Aussaat im Direktsaatverfahren	Claydon Hybrid T8, 8 m Claydon Hybrid T6 bis 2024, 6 m
Scheibenegge	Stoppelsturz	Horsch Joker, 8 m
Universalgrubber	Stoppelsturz bis Grundbodenbearbeitung	Köckerling Vector, 5,70 m
Präzisionsgrubber	Grundbodenbearbeitung bis Saatbettbereitung	Köckerling Allrounder-flatline, 9 m
Feingrubber	Saatbettbereitung	Köckerling Allrounder-profile, 9 m
Kompaktor	Saatbettbereitung	Rabe Kompaktor, 6 m
Aufsattelvoll-drehpflug	Grundbodenbearbeitung, Saatfurche	Kverneland 8-Schar, 2,80 – 4 m
Einzelkornsämaschine - Lohnarbeit	Aussaat im Einzelkornverfahren bei Mais, Sojabohne, Weiße Lupine, Sonnenblume, teilweise Winter-raps	Monosem NC, 9,10 m Väderstad Tempo, 9,10 m
Ackerwalze	Rückverfestigung Saatbett	Amazone AW1220, 12,20 m
Kurzscheibenegge	Stoppelsturz	Lemken Rubin, 6 m
Scheibengrubber	Flache Bodenbearbeitung	Lemken Smaragd, 6 m
Strohstriegel	Stoppel nach Ernte striegeln	Claydon 7,50 m & 15 m
Fronthacke	Mechanischer Pflanzenschutz	Claydon Terrablade 6 m
Mulcher	Maisstoppen mulchen	Neff, 6 m
Häcksler -Lohnarbeit	Futterernte	Fendt Katana
Mähdrescher	Drusch	John Deere T670, 9 m
Selbstfahrende Pflanzenschutz-spritze	Chemischer Pflanzenschutz	Voraussichtlich bis Ende 2024 Hardi Alpha Evo, 24 m
Anhängespritze	Chemischer Pflanzenschutz	Amazone UG 3000, 24 m
Hacke-Bandspritze	Kominiertes & mechanischer Pflanzenschutz	Amazone/Schmotzer, 9,10 m
Striegel	Mechanischer Pflanzenschutz	Einböck Aerostar 24 m
Düngerstreuer	Mineralische Düngung	Güstrower D 66
Stalldüngestreuer	Organische Düngung	Annaburger HTS 22.?
Gülleausbringung - Lohnarbeit	Organische Düngung mit Einarbeitung oder Schleppschlauch	Holmer mit Scheibenegge Fendt 1050+ Samson PG und 24 m Schleppschlauch

Traktoren		John Deere 7730, 7930, 8520, 8335R, 6250R, 7920R, 8400R Fendt 936, 824, 942 Valtra T235
-----------	--	---

4. Fruchtfolge: 4 verschiedene Varianten mit einer Drittelung der Fläche unter APV (Handlungsoptionen)

Im Folgenden werden vier Varianten für umsetzbare Fruchtfolgen unter der Bewirtschaftung des TLPVG vorgestellt. Jede Zeile ist eine in sich stimmige Fruchtfolge die Agrotechnisch und Phytosanitär realisierbar ist.

Option 1:

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1.	WW	SG	WG	Raps	WW	Erbse	SG	Öllein	WW	Raps	Dinkel
2.	WW	SG	Raps	WG	Mais	SG	Erbse	Dinkel	Raps	SG	Mais
3.	WW	SG	Erbse	WW	Raps	WG	Mais	WW	Soja	WW	Raps

Option 2

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1.	SG	WW	Raps	Dinkel	AB	WW	Öllein	Roggen	Mais	WW	Erbse
2.	SG	WW	Erbse	WG	Raps	SG	Mais	WG	Lup	Roggen	Raps
3.	SG	WW	Öllein	Durum	Mais	WG	Soja	WW	Raps	Dinkel	SG

Option 3

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1.	WW	SG	Soja	WW	SoBl	Hafer	Raps	WW	AB	WG	Öllein
2.	WW	SG	Mais	Dinkel	Erbse	WW	SG	Roggen	Raps	WW	Soja
3.	WW	SG	Raps	Roggen	Öllein	WG	Lup	Dinkel	SG	Raps	WW

Option 4

	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	2035
1.	SG	WW	Erbse	WW	SoBl	Dinkel	Raps	SG	AB	WG	Raps
2.	SG	WW	Öllein	Dinkel	Soja	WW	SoBl	Roggen	Raps	WW	Erbse
3.	SG	WW	Mais	WG	Raps	SG	Lup	WW	SoBl	Dinkel	Öllein

5. Handelsanalysen

Gängige Handelsanalysen beinhalten die folgenden Messparameter:

- Ertrag in dt/ha oder dt FM/ha
- Feuchte in % oder TM in %
- Fallzahl in s bei Getreide
- Sedi bei Getreide
- Proteingehalt in %
- Hektolitergewicht
- Besatz in %
- Fremdgetreideanteil in %
- Ölgehalt in %

6. Auflistung Bewirtschaftungshäufigkeit nach Bewirtschaftungsart pro Kultur und mit welchen Maschinerien

Kultur	Bewirtschaftungsart	Häufigkeit	Gerät
Winterweizen	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2 je nach Witterung, Zerfall Boden	Universalgrubber, Präzisionsgrubber
	Saatbettbereitung	1	Feingrubber, Präzisionsgrubber
	Aussaat	1	Köckerling Ultima CS, oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	3-4	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000/ Einböck Striegel
	Düngungsmaßnahmen	2-3	Güstrower D66, Gülle Lohn
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670

Winterraps	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2 je nach Witterung, Zerfall Boden	Universalgrubber, Präzisionsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krümelung	Feingrubber, Präzisionsgrubber
	Aussaat	1	Köckerling Ultima CS, oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	4-5	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000/ Hacke-Bandspritze
	Düngungsmaßnahmen	1-2	Güstrower D66, Stallungstreuer o. Gülle Lohn
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Wintergerste	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2 je nach Witterung, Zerfall Boden	Universalgrubber, Präzisionsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krümelung	Feingrubber, Präzisionsgrubber
	Aussaat	1	Köckerling Ultima CS, oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	3-4	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000/ Einböck Striegel
	Düngungsmaßnahmen	1-2	Güstrower D66, Gülle Lohn
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Dinkel	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2 je nach Witterung, Zerfall Boden	Universalgrubber, Präzisionsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krümelung	Feingrubber, Präzisionsgrubber
	Aussaat	1	Köckerling Ultima CS, oder Claydon T

			8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	3-4	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000/ Einböck Striegel
	Düngungsmaßnahmen	1-2	Güstrower D66
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Roggen	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2 je nach Witte- rung, Zerfall Boden	Universalgrubber, Präzisionsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krüme- lung	Feingrubber, Präzi- sionsgrubber
	Aussaat	1	Köckerling Ultima CS, oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	3-4	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000/ Einböck Striegel
	Düngungsmaßnahmen	1-2	Güstrower D66
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Sommergerste	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2 je nach Witte- rung, Zerfall Boden	Universalgrubber, Präzisionsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krüme- lung	Feingrubber, Präzi- sionsgrubber
	Aussaat	1	Köckerling Ultima CS, oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	2-3	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000/ Einböck Striegel
	Düngungsmaßnahmen	1	Güstrower D66
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670

Hafer	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2 je nach Witterung, Zerfall Boden	Universalgrubber, Präzisionsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krümelung	Feingrubber, Präzisionsgrubber
	Aussaat	1	Köckerling Ultima CS, oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	2-3	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000/ Einböck Striegel
	Düngungsmaßnahmen	1	Güstrower D66
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Öllein	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1	Pflug
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krümelung	Feingrubber, Präzisionsgrubber, Kompaktor
	Aussaat	1	Köckerling Ultima CS, oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	2-3	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000
	Düngungsmaßnahmen	1	Güstrower D66
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Erbsen	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2	Pflug, Universalgrubber, Präzisionsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krümelung	Feingrubber, Präzisionsgrubber, Kompaktor
	Aussaat	1	Köckerling Ultima CS, oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)

	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	1-3	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000, Striegel Einböck
	Düngungsmaßnahmen	0-1	Güstrower D66
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Weiß Lupine	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2	Pflug, Univer- salgrubber, Präzisi- onsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krüme- lung	Feingrubber, Präzi- sionsgrubber, Kom- paktor
	Aussaat	1	Einzelkorn (Lohn) oder Claydon T 8 (dabei weniger Bo- denbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	1-3	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000, Striegel Einböck, Hacke-Bandspritze
	Düngungsmaßnahmen	0-1	Güstrower D66
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Sojabohne	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2	Pflug, Univer- salgrubber, Präzisi- onsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krüme- lung	Feingrubber, Präzi- sionsgrubber, Kom- paktor
	Aussaat	1	Einzelkorn (Lohn) oder Claydon T 8 (dabei weniger Bo- denbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	1-3	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000, Striegel Einböck, Hacke-Bandspritze
	Düngungsmaßnahmen	0-1	Güstrower D66

	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Ackerbohne	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2	Pflug, Universalgrubber, Präzisionsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krümelung	Feingrubber, Präzisionsgrubber, Kompaktor
	Aussaat	1	Köckerling Ultima CS oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	1-3	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000, Striegel Einböck
	Düngungsmaßnahmen	0-1	Güstrower D66
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Sonnenblume	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2	Pflug, Universalgrubber, Präzisionsgrubber
	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krümelung	Feingrubber, Präzisionsgrubber, Kompaktor
	Aussaat	1	Einzelkorn (Lohn) oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	1-3	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000, Striegel Einböck, Hacke-Bandspritze
	Düngungsmaßnahmen	0-1	Güstrower D66
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670
Mais	Stoppelsturz	1-2 je nach Auflauf der Ausfallkörner	Strohstriegel, Scheibenegge, Kurzscheibenegge
	Grundbodenbearbeitung	1-2	Universalgrubber, Präzisionsgrubber

	Saatbettbereitung	1-2 je nach Krümelung	Feingrubber, Präzisionsgrubber, Kompaktor
	Aussaat	1	Einzelkorn (Lohn) oder Claydon T 8 (dabei weniger Bodenbearbeitung)
	Anwalzen	1	Ackerwalze
	Pflanzenschutzmaßnahmen	1-3	Hardi Selbstfahrer/ Amazone UG 3000, Striegel Einböck, Hacke-Bandspritze
	Düngungsmaßnahmen	0-1	Güstrower D66
	Ernte	1	Mähdrescher John Deere T670

7. Basis-Messkonzept (Vorschlag von TLPVG)

- Bodenparameter über eingelassene Bodensonden – ähnlich den bereits vorhandenen Messstationen, welche umfahren werden
- N-Sensorik
- Pflanzenanalysen
- Handelsanalysen
- Ertragshöhe

Literaturverzeichnis

- AKHTER, N., RAHMAN, M. M., HASANUZZAMAN, M., & NAHAR, K. (2009): Dry Matter Partitioning in Garden Pea (*Pisum sativum* L.) As Influenced by Different Light Levels. *Academic Journal of Plant Sciences* 2 (4): 233-236
- ARENAS-CORRALIZA, M. G., ROLO, V., LÓPEZ-DÍAZ, M. L., MORENO, G. (2019): Wheat and Barley Can Increase Grain Yield in Shade through Acclimation of Physiological and Morphological Traits in Mediterranean Conditions. *Scientific Reports* 9 (1).
- BAZZAZ, F. A., HARPER, J. L. (1977): Demographic analysis of the growth of *linum usitatissimum*. *New Phytologist*, 78(1): 193-208
- BLANCHET, G., BARKAOUI, K., BRADLEY, M., DUPRAZ, C., & GOSME, M. (2022): Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea grown in a 25-year-old walnut-based alley cropping system. *Journal of Agronomy and Crop Science*, Volume 208, Issue 5.
- CANTAGALLO, J. E., MEDAN, D., & HALL, A. J. (2004): Grain number in sunflower as affected by shading during floret growth, anthesis and grain setting. *Field Crops Research*, 85: 191-202
- DUPRAZ, C. (2023): Assessment of the Ground Coverage Ratio of Agrivoltaic Systems as a Proxy for Potential Crop Productivity. *Agroforestry Systems*. Springer Science and Business Media B.V..
- EDOUARD, S., COMBES, D., VAN ISEGHEM, M., NG WING TIN, M., ESCOBAR-GUTIÉRREZ, A.J. (2023): Increasing land productivity with agriphotovoltaics: application to an alfalfa field. *Applied Energy* 329: 120-207
- GARROD, A., HUSSAIN, S. N., GHOSH, A. (2024): The Technical and Economic Potential for Crop Based Agrivoltaics in the United Kingdom. *Solar Energy* 277 (July).
- KEJIA PANG, K., VAN SAMBEEK, J. W., NAVARRETE-TINDALL, N. E., LIN C-H, J. AND S., GARRETT, H. E. (2017): Responses of legumes and grasses to non-, moderate and dense shade in Missouri, USA. I. Forage yield and its species-level plasticity *Agrofor. Syst.* 93: 11-24
- LAUB, M., PATACZEK, L., FEUERBACHER, A., ZIKELI, S., HÖGY, P. (2022): Contrasting yield responses at varying levels of shade suggest different suitability of crops for dual land-use systems: a meta-analysis *Agron. Sust. Dev.* 42.

- LINDSTRÖM, L. I., PELLEGRINI, C. N., AGUIRREZÁBAL, L. A. N., & HERNÁNDEZ, L. F. (2006): Growth and development of sunflower fruits under shade during pre and early post-anthesis period. *Field Crops Research*, 96(1): 151-159
- MANTINO, A., TOZZINI, C., BONARI, E., MELE, M., & RAGAGLINI, G. (2021): Competition for Light Affects Alfalfa Biomass Production More Than Its Nutritive Value in an Olive-Based Alley-Cropping System. *Forests*, 12(2), 233.
- NASRULLAHZADEH, S., GHASSEMI, K., JAVANSHIR, A., VALIZADE, M., & SHAKIBA, M. R. (2007): Effects of shade stress on ground cover and grain yield of faba bean (*Vicia faba* L.). *Journal of Food, Agriculture & Environment* Vol.5 (1) : 337-340
- SKUNDELNY, T., ZAPFE, C. (2024): Erstes Agri-PV-Projekt mit Tracker in Deutschland: Sechs Lehren aus vier Jahren Betrieb. Pv magazine: <https://www.pv-magazine.de/2024/03/21/erstes-agri-pv-projekt-mit-tracker-in-deutschland-sechs-lehren-aus-vier-jahren-betrieb/>, abgerufen am 8. November 2024.
- TOWNER, E., KARAS, T., JANSKI, J., MACKNICK, J., RAVI, S. (2022): Managed sheep grazing can improve soil quality and carbon sequestration at solar photovoltaic sites.
- VARELLA, A. C., MOOT, D. J., POLLOCK, K. M., PERI, P. L., LUCAS, R. J. (2011): Do Light and Alfalfa Responses to Cloth and Slatted Shade Represent Those Measured under an Agroforestry System. *Agroforestry Systems* 81 (2): 157-73
- WYDRA, K., VOLLMER, V., SCHMIDT, S., PRICHTA, S., KUNZE, AULICH, H. (2022): Potential Der Agri-Photovoltaik in Thüringen. SolarInput e.V.: https://solarinput.de/wp-content/uploads/2022/05/APV-Studie_19052022_Final.pdf, abgerufen am 11. November 2024.
- YANAGISAWA, Y. (1964): Influences of Some Environmental Conditions upon the Growth and Development of the Flax Plant, *Linum usitatissimum* L. *Proceedings Crop Science Society Jap*, 32(3): 229-232
- YELIGETI, M., HU, W., SCHOLZ, Y., STEGEN, R., VON KRBK, K. (2023): Cropland and Rooftops: The Global Undertapped Potential for Solar Photovoltaics. *Environmental Research Letters* Volume 18, Number 5.

ZHANG, K., QIAN, M., WANG, Y., LI, Z., KONG, L., LI, M., MA, J., NUERAIHEMAIT, Y., CHEN, Y., CHENG, Y.,
FENG-FEI, Q., & QU, H. (2024): Comprehensive Evaluation and Screening of Identification
Indexes for Shade Tolerance of Alfalfa. Chinese Journal of Plant Ecology, 0.

An: Dr. Stefan Ehrentraud ([FH Erfurt, FGK](#))
Ta-Fang Lin ([FH Erfurt, FGK](#))
Dr. Uwe Drüge ([FH Erfurt, FGK](#))
Katja Burow ([FH Erfurt, FGK](#))
Dr. Anna Kodisch (PPA)
Carolin Altmann (PPA)
Janina Happ ([SolarInput](#))

Unser Zeichen: FGK, PPA
Name: Dr. Stefan Ehrentraud
Dr. Uwe Drüge
Katja Burow
Dr. Anna Kodisch
Telefon: +49 361 6700 3463 (FGK)
+49 3466 3256 22 (PPA)
Telefax: +49 361 6700 721 (FGK)
+49 3466 3256 20 (PPA)
E-Mail: stefan.ehrentraud@fh-erfurt.de
uwe.druege@fh-erfurt.de
katja.burow@fh-erfurt.de
anna.kodisch@pharmaplant.de
Internet: <https://www.fh-erfurt.de/forschungsstelle-fuer-gartenbauliche-kulturpflanzen-fgk>
www.pharmaplant.de

Maximalkonzept für das Vorhaben: „Agri-PVThue - Innovative Konzepte zum Schutz der Pflanzenkulturen bei gleichzeitiger Stromerzeugung auf der Ackerfläche in Thüringen: Agri-Photovoltaik“

Ausgangssituation

Das Thema Agri-PV verbindet die landwirtschaftliche Nutzung einer Fläche mit der Energieerzeugung durch eine PV-Anlage. In dem Projekt „Agri-PVThue - Innovative Konzepte zum Schutz der Pflanzenkulturen bei gleichzeitiger Stromerzeugung auf der Ackerfläche in Thüringen: Agri-Photovoltaik“ sollen zunächst Konzepte entwickelt werden, um die Anbauevaluierung von verschiedenen Kulturarten unter Agri-PV weiter voranzubringen. Hauptfokus der Forschungsgruppe „Epigenetik“ der Forschungsstelle für Gartenbauliche Kulturpflanzen (FGK) ist der Einfluss der veränderten Umgebung auf verschiedene Pflanzen-Merkmale, vor allem der Hintergrund wie sich Pflanzen an die veränderte Umgebung anpassen. Als Messgröße für eine Anpassung werden hier vor allem epigenetische Marker betrachtet. In Kooperation mit anderen Forschungsgruppen der FGK sollen ebenfalls als weitere Messgrößen die/das Boden/Pflanzen-Mikrobiota/ Mikrobiom (Forschungsgruppe „Pflanzen-Mikroorganismen-Wechselwirkungen“) und pflanzenphysiologische Parameter (Forschungsgruppe „Entwicklungssteuerung in gartenbaulichen Kulturen“) untersucht werden.

Neben einem Basiskonzept (Durchführung ohne Fördergelder realisierbar, gängige Ackerbaukulturen wie Zuckerrübe, Mais, o.ä.), soll ein Maximalkonzept zur Bearbeitung von Kräuter-, Arznei-, Gemüse- und

Konzeptionelle Idee

Gewürzpflanzen erarbeitet werden, welches durch zusätzlich eingeworbene Fördermittel realisiert wird.

In dem Maximalkonzept sollen Kulturarten aus dem Bereich Kräuter-, Arznei-, Gemüse- und Gewürzpflanzen berücksichtigt werden, da diese in der Industrie für die Herstellung von Phytopharmaka und Lebens- und Genussmittel eine große wirtschaftliche Bedeutung besitzen.

Anbau von verschiedenen Sonderkulturen (Pfefferminze, Melisse, Fenchel, Knoblauch, Brokkoli) in einer randomisierten Parzellenanlage unter / ohne einer PV-Anlage und Erfassung essenzieller Parameter.

Ziel(e) des Verbundvorhabens

- (1) Erforschung der Anbaueignung und -fähigkeit (Bsp. Reaktion von Beschattung auf Ertrag und Inhaltsstoffe, epigenetische Marker) von Kräuter-, Arznei-, Gemüse- und Gewürzpflanzen bei gleichzeitiger Stromerzeugung unter einer PV-Anlage (Agri-Photovoltaik).
- (2) Untersuchung des Einflusses einer PV-Anlage auf:
 - a. Ertrags- und Qualitätsparameter
 - b. Bodenparameter (Fruchtbarkeit, Humusbildung, Wassergehalt, Boden/Pflanzen-Mikrobiota/Mikrobiom, etc.)
 - c. abiotische Faktoren (Temperatur, Boden- und Luftfeuchtigkeit)
 - d. epigenetische Veränderungen
 - e. Pflanzenphysiologische Parameter (Photosynthese-Aktivität, Konzentrationen an Zuckern und Stärke)
- (3) Erfassung der wirtschaftlichen Rentabilität
- (4) Schaufläche zu Demonstrationszwecken und zielgruppengerechter Kommunikation

Kulturpflanzen

Pfefferminze (*Mentha piperita*), Melisse (*Melissa officinalis*), Fenchel (*Foeniculum vulgare*), Brennnessel (*Urtica dioica*), Kamille (*Matricaria recutita*), Brokkoli (*Brassica oleracea*), Spinat (*Spinacia oleracea*), Knoblauch (*Allium sativum*), Zwiebel (*Allium cepa*), Erbse (*Pisum sativum*).

Versuchsort

Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR)

Versuchstyp und Eckdaten

Parzellenanlage, 3 Wiederholungen, vollständig randomisiert, 2 Sorten/bzw. Herkünfte pro Kulturart, 4 Faktoren: Kulturpflanze (10), Sorte (2), Mulchschicht (j/n), Agri-PV (j/n).

Allgemeine Informationen

- Einheitliche Vorfrucht pro Kulturart (unterschiedliche Anforderungen der Kulturarten werden berücksichtigt)
- Ackerbauliche Maßnahmen erfolgen praxisnah (Einhaltung von Wartezeiten bei PSM-Anwendung, mechanische Unkrautbekämpfung, Saatbettvorbereitung, etc.)

Forschungsfragen

- Welche Auswirkung hat eine Beschattung auf inhaltsstoffliche Parameter (Ölqualität, Ölzusammensetzung) und die Ertragsmenge (Frisch-, Trockengewicht, Ölgehalt) auch in Hinsicht auf unterschiedliche Verwendungen (Ölgewinnung, Krautdroge für Tee, Kräuter)?

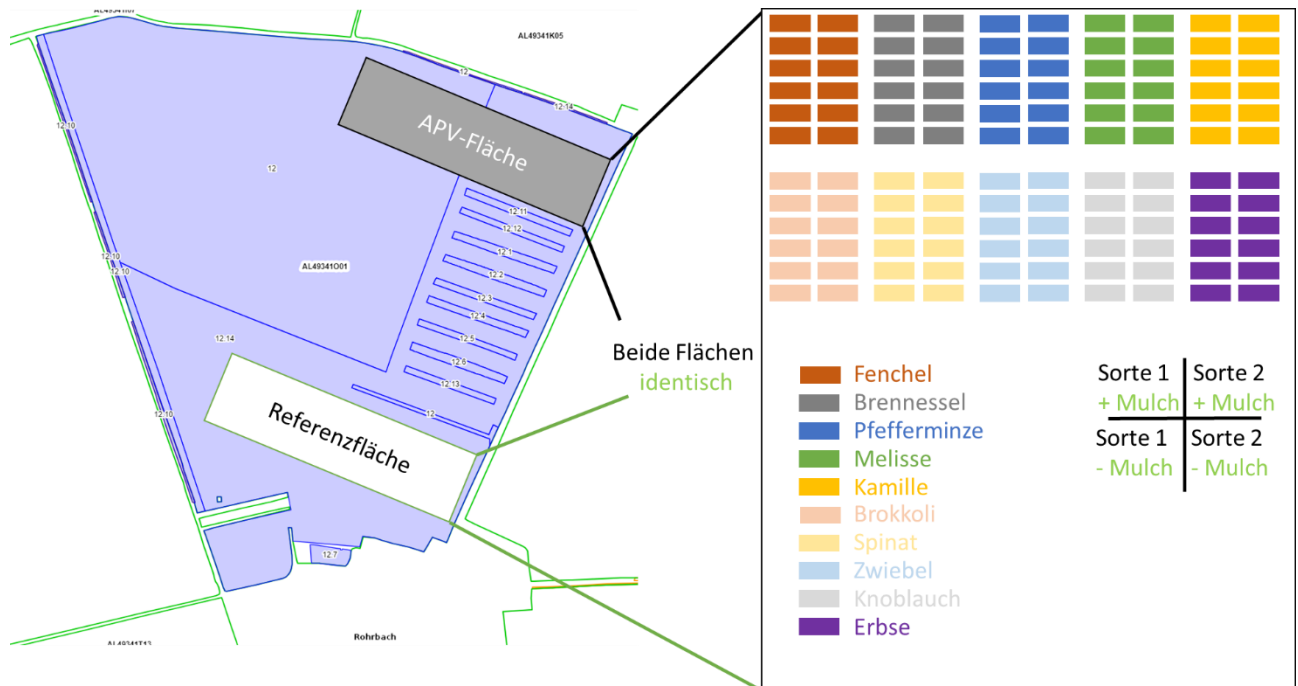
- Ist der Anbau unter einer PV-Anlage umsetzbar/ machbar und ökonomisch rentabel?
- Wie wirkt sich die durch die PV-Anlage einhergehenden Umweltbedingungen (z.B. (physiko)chemische Bodenparameter, Beschattung, Bewässerung) auf die Zusammensetzung der Mikrobiota/ des Mikrobioms in der Rhizosphäre und in der Pflanze aus (z.B. Vertreter Pflanzenwachstumsfördernder Mikroorganismen/ Phytopathogene). Besteht ein Zusammenhang zu sich veränderten pflanzlichen Inhaltsstoffen?
- Welche Besonderheiten (Erntetechnik, Düngung, Pflanzenschutz, Schädlingsdruck, o.ä.) ergeben sich für Planung, ackerbauliche Maßnahmen und Kulturführung?
- Welchen Einfluss hat die Sortenwahl und gibt es eine Sorteneignung für den Anbau unter einer PV-Anlage?
- Welchen Einfluss hat die Nutzung einer Mulchschicht (Bsp. Holzhackschnitzel) für die Beikrautregulation/-unterdrückung, der/das Mikrobiota/ Mikrobiom des Bodens, Erhöhung der Wasserhaltefähigkeit des Bodens und welche Auswirkungen hat eine solche Schicht bei der Erntefähigkeit (Schnitthöhe, Verunreinigung des Ernteprodukts, o.ä.)?
- In wie fern beeinflusst eine solche Mulchschicht Anwendungsgaben der Kulturführung wie Düngemittel, Pflanzenschutzmaßnahmen, o.ä.?
- Beeinflusst eine Mulchschicht die (epigenetische) Anpassung an veränderte Umweltparameter (Beschattung und ein möglicherweise verändertes Boden-Mikrobiom)?
- Wie verändert eine veränderte Belichtung den Kohlenhydrat-Haushalt der Pflanzen?

Prüfmerkmale und deren Erfassung

- (1) Performance und Ertragsparameter
 - a. Gesamteindruck, Wüchsigkeit (Begleitung über kompletten Kulturverlauf)
 - b. Drusch von Körnern, Erfassung der Frisch-/Trockenmasse (abhängig von Kulturart und Verwendung)
 - c. Bei Saatgut: Saatgutqualitätsparameter (Keimfähigkeit, Fremdbesatz, 1000-Korn-Gewicht, etc.)
- (2) Inhaltsstoffparameter
 - a. Ölgehalt
 - b. Ölzusammensetzung
- (3) Unkrautvorkommen
 - a. Ermittlung des Unkrautbefalls im Entwicklungsverlauf
- (4) Bodenparameter
 - a. Nährstoffe, Humusgehalt (regelmäßige Bodenproben)
 - b. Wassergehalt
 - c. Mikrobiom
- (5) Abiotische Faktoren
 - a. Temperatur
 - b. Niederschlagsmenge

c. Witterungsverlauf
(6) Pflanzenmaterial für epigenetische Untersuchungen

- 12 Parzellen pro Kulturart = 120 Parzellen insgesamt (+/- Agri-PV = 240 Parzellen):



Zugrunde liegende Information:

- Referenz-Genom Brokkoli: <https://academic.oup.com/hr/article/11/5/uhae063/7616067>
- Referenz-Genom Spinat: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-27432-z>
- Referenz-Genom Erbse: <https://urgi.versailles.inra.fr/Species/Pisum/Pea-Genome-project>
- Referenz-Genom Knoblauch: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/32730994/>
- Referenz-Genom Zwiebel: <https://www.oniongenome.wur.nl/>
- Referenz-Genom Fenchel: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/?taxon=2849586>
- Referenz-Genom Brennessel: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/datasets/genome/?taxon=3501>

Die Forschungsstelle für gartenbauliche Kulturpflanzen (FGK) besteht aus vier Drittmittel-geförderten Projekten an der Fachhochschule Erfurt, die sich mit gartenbauwissenschaftlichen Themen beschäftigen. Neben der Forschungsgruppe „Züchtungsforschung“, werden weitere Schwerpunkte im Bereich „Epigenetik“, „Pflanzen-Mikroorganismen-Wechselwirkungen im nachhaltigen Anbau“ und „Entwicklungssteuerung“ bearbeitet.

Prof. Dr. rer. nat. Philipp Franken, Inhaber des Lehrstuhls „Molekulare Phytopathologie“ an der Friedrich-Schiller-Universität Jena und wissenschaftlicher Leiter der FGK beschäftigt sich mit dem Einsatz von Mikroorganismen in der nachhaltigen Produktion von resilienten Nutzpflanzen. Er wird studentische Abschlussarbeiten mit Themen im Bereich „Umwelteinflüsse auf Pflanzen-Mikroorganismen-Wechselwirkungen“ betreuen. Die Forschungsgruppe untersucht die Besiedelung von Pflanzenwurzeln mit endophytischen Pilzen und Bakterien mit mikroskopischen und molekularen Methoden. Eine Stammsammlung von solchen Endophyten steht zur Verfügung, die kontinuierlich erweitert und

charakterisiert wird. Konsortien dieser Mikroorganismen werden eingesetzt, um Pflanzenernährung und -gesundheit unter verschiedenen Umwelteinflüssen zu fördern.

Dr. rer. nat. Stefan Ehrentraut, Gruppenleiter der Forschungsgruppe „Epigenetik“ beschäftigt sich mit dem Einfluss von Kultivierungsbedingungen auf epigenetische Muster in der nachhaltigen Produktion von Nutzpflanzen. Er wird studentische Abschlussarbeiten mit Themen im Bereich „Epigenetische Prozesse während der Pflanzenkultivierung“ betreuen. Die Forschungsgruppe beschäftigt sich mit Mechanismen der Genregulation, die über die Information in der DNA-Sequenz hinausgehen. Diese Informationen umfassen DNA-Methylierung, Histon-Modifikationen sowie genregulatorische RNA-Moleküle. Die Art und Ausprägung dieser Faktoren reguliert die Verpackungsdichte der DNA und somit die Zugänglichkeit der DNA für Transkriptionsprozesse.

PD Dr. rer. nat. Uwe Drüge, Gruppenleiter der Forschungsgruppe „Entwicklungssteuerung“ erforscht die „Steuerung von Entwicklung und Wachstum in gartenbaulichen Kulturen“, mit einem Hauptfokus auf die Adventivwurzelbildung als Grundlage der vegetativen Vermehrung vieler Zierpflanzenarten. Die Aufklärung wichtiger Funktionsbeziehungen zwischen bestimmten Genen, den Phytohormonsignalketten und dem Primärstoffwechsel soll zu neuen Ansatzpunkten für ein wissenschaftlich basiertes Kultur-Management beitragen. Er wird studentische Abschlussarbeiten zu dem Themenbereich „pflanzenphysiologische und pflanzenbiochemische Parameter“ betreuen.

Durch die Beteiligung der einzelnen Forschungsgruppen wird der Anschluss zu Forschung und Transfer in und aus der Wissenschaft in die Praxis gestärkt.

Die PHARMAPLANT Arznei- und Gewürzpflanzen Forschungs- und Saatzucht GmbH ist ein moderner Forschungsdienstleister im Arznei- und Gewürzpflanzenbereich mit langjähriger Expertise. Wir standardisieren den Anbau von Arznei- und Gewürzpflanzen, um die Lieferketten pflanzlicher Rohstoffe für unsere Kunden nachhaltig zu sichern. Mit industrienaher Forschung und Züchtung optimieren wir pflanzliche Inhaltsstoffe und den Ertrag natürlicher Ressourcen. Als Teil der Unternehmensgruppe the nature network wird ein weltweit einzigartiges Spektrum für Produkte und Dienstleistungen rund um die Pflanze geboten: von der verantwortungsvollen Beschaffung hochwertiger pflanzlicher Rohstoffe, ihrer schonenden Verarbeitung mit zertifizierten Methoden, der Entwicklung von innovativen, auf die Bedürfnisse der Produktanwendung unserer Kunden zugeschnittene Produkten bis hin zur Übernahme von Labor-, Beratungs- und Vertriebsdienstleistungen.

Dr. Anna Kodisch, wissenschaftliche Projektleitung bearbeitet Projekte rund um die Themen Inkulturnahme, Anbauoptimierung, Beikraut- und Fruchtfolgemangement, Anwendung von Botanicals als aktive Inhaltsstoffe, Beratung und Einsatz von Technologie und Dual-Use-Systemen, um die Landwirtschaft nachhaltig und effizient zu gestalten.

Wassermanagement - Agri-PVThue

Regenwassermanagement im Kontext von Agri-Photovoltaik (APV) Anlagen in Thüringen

Prof. Ing. Axel Klapka, Hannes Frömchen

Regenwassermanagement spielt im Rahmen der schon eingetretenen Klimaveränderungen und vor dem Hintergrund sich verstärkender Trockenheits- und Regenperioden sowie deutlich ergiebigerer Niederschlagsereignisse auch in der Anwendung von Agri-PV eine immer wichtiger werdende Komponente zum wirtschaftlichen und nachhaltigen Betrieb bzw. der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung dar. Insbesondere wirken sich die Klimaeffekte im Thüringer Becken durch länger anhaltenden Trockenperioden und sinkende Grundwasserstände aus und haben direkte Auswirkungen auf die Landwirtschaft.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Verhalten unterschiedlicher Kulturen unter Agri-PV-Anlagen spielt das Wassermanagement daher eine wesentliche Rolle.

Es ist davon auszugehen, dass die Errichtung einer Agri-PV-Anlage allein durch ihre physische Präsenz eine Beeinflussung ihrer Umwelt mit sich bringt. (Adeh, 2018) Diese betrifft auch Umweltfaktoren, die für die Wasserversorgung der Kulturen und den Wasserkreislauf des betroffenen Feldschlags von Bedeutung sind. Zudem bieten APV-Anlagen durch ihre Gestalt die Möglichkeit, Rain Water Harvesting zu betreiben und somit eine Sekundärnutzung zu implementieren. In Verbindung mit diesem würde ein Speicherungs- und Bewässerungssystem umfangreiche Möglichkeiten bieten, in das Wassermanagement auf dem Feldschlag einzugreifen. (Rößner, 2022)

Bereits vorangegangene Forschung in Indien hat gezeigt, dass die Verbindung der Stromerzeugung und des Rain Water Harvesting auf einem Feldschlag bei optimaler Dimensionierung potenziell in der Lage ist, sich selbst in einem geschlossenen Kreislauf mit Wasser und Energie für Bewässerung und Bewirtschaftung zu versorgen. (Santra, 2020)

Im Laufe der Forschung sollen Messungen verschiedener Parameter Aufschlüsse geben, inwiefern sich die Errichtung der APV-Anlage und des Regenwassermanagement-Systems auf den Wasserkreislauf sowie auf Performance und Ertrag der Kulturen auswirken können.

In der Vergangenheit spielte das Wassermanagement in Form von Bewässerung auf landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland aufgrund fehlender Wirtschaftlichkeit nur eine untergeordnete Rolle. 2009 wurden hierzulande 372.700 Hektar der bewirtschafteten Flächen bewässert. Der Trend zeigt jedoch, dass sich diese Fläche über die Jahre vergrößert. 2022 wurden mit 554.000 Hektar Fläche schon 49 % mehr bewässert. Das heißt, dass auf 3,3 % der gesamten landwirtschaftlichen Fläche bewässert wurde, wobei das vor allem Kartoffel- und Zuckerrübenflächen betraf. (Statistisches Bundesamt, 2024)

Die zahlreichen Dürresommer der letzten Jahre haben dem Thema zusätzliche Resonanz verschafft. Neben einer effizienten Bewässerung wird in Zukunft auch die Sammlung von Wasser und dessen Speicherung eine größere Rolle spielen, um Dürreperioden zu überdauern. Das seit 2020 laufende Verbundprojekt „LAWAMAD“ des Thünen-Instituts hat sich

beispielsweise zum Ziel gesetzt, die Verfügbarkeit von Bewässerungswasser für den Pflanzenbau zu erhöhen und sich ein Bild über die zukünftige Bewässerungsbedürftigkeit zu machen. (Thünen-Institut, Fachinstitut für Lebensverhältnisse in ländlichen Räumen, 2020)

Dass das Wassermanagement in Zukunft mehr Bedeutung erlangen kann, zeigt auch ein Blick auf die Regendaten des in Thüringen liegenden Buttstedt, das hier als Beispiel betrachtet wird: Die Wetterstation zeigt in 12 der 20 zuletzt gemessenen Jahre eine Abweichung von mindestens 10 % zum langjährigen Niederschlagsmittel. Oft beträgt sie sogar bis zu 30 % (Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum, 2023). Das zeigt, dass die Niederschlagsmengen größeren Schwankungen unterliegen und es mehr besonders trockene und besonders feuchte Jahre geben wird. Ein geeignetes Wassermanagement und die Speicherung von Regenwasser könnte hier für einen flexibleren Umgang mit den zu erwartenden Extremwetterverhältnissen sorgen.

In Indien konnte in einer Anlage mit einer Modulgesamtfläche von 651 qm in einem Jahr 150.000 L Regenwasser gesammelt werden. Das entspricht einem Bewässerungspotenzial von 15 mm pro Hektar, welches flexibel zur Verfügung stehen würde. (Santra, 2018)

Als **Aufgaben für die vorgesehenen Forschungen im Bereich des Wassermanagements** werden unterschiedliche Aspekte ins Auge gefasst. Einerseits sollte eine Auswertung der Wetter- und Klimadaten in Bezug auf verschiedene Systeme und Kombinationen von Modulen, Aufständern und Kulturen stattfinden. Weiterhin sollten verschiedene Möglichkeiten der gesteuerten Sammlung, Bevorratung und Bewässerung im System evaluiert werden. Langfristig soll die Untersuchung der Auswirkungen der von der APV-Anlage beeinflussten Niederschläge und Evapotranspirationsvorgänge auf den Boden und die Kulturen stattfinden.

Im Fokus soll die Entwicklung eines „Rain Water Harvesting – Systems“ stehen, das auf die eingesetzten PV-Module und deren Anbringung, dem Abstand zueinander, Neigung etc. abgestimmt ist und im Sinne der Kreislaufwirtschaft zusätzliche Effekte für die Kulturen erschließt.

Die Konstruktion des Rain Water Harvesting-Systems soll die Sammlung und den Abtransport des auftreffenden Regenwassers ermöglichen. Hierzu werden unterhalb der Abtropfkante der Solarpanels Regenrinnen installiert, wobei handelsübliche, verzinkte Regenrinnen verwendet werden können. (Bousi, 2023) Die Regenrinnen müssen mit einem ausreichenden Gefälle installiert werden (ca. 3-5 mm/m) um einen guten Abfluss zu ermöglichen. Außerdem sollten die Rinnen mit Gittern vor Verunreinigungen geschützt werden, um Wartungsarbeiten zu reduzieren. Die Sammlung des Wassers sollte abseits des Feldes in einem Behälter erfolgen, in den das Wasser durch Sammelrohre gelangt. Die Wiederverwendung des Wassers könnte in Hinsicht auf die Bewirtschaftungsweise des Feldschlags durch Sprinkler realisiert werden, die an der Unterkonstruktion der Solarpanels montiert werden, oder, je nach Kultur, durch Tröpfchenbewässerungssysteme. (Rößner, 2022)

Neben den notwendigen hydrologischen Berechnungen müssen im Bezug auf unterschiedliche PV Systeme deren Möglichkeiten auf eine technische Anpassungen zum Sammeln und Aufbereiten, wie auch zur Weiterleitung oder Direktverregnung des auftreffenden Regenwassers geprüft werden. Darüber hinaus könnte die Kombination von

Bewässerungssystemen auf und unterhalb der PV-Anlagen mit den Auswirkungen auf die Kulturen geprüft werden. Solche Systeme sind noch nicht in der Praxis etabliert bzw. erforscht. (SolarPower Europe, 2024) Die Untersuchungen sind stets an die Bewirtschaftungsweise und den Bewuchs des Feldschlags anzupassen um eine möglichst praxisnahe Darstellung der Verhältnisse zu erlangen. Die Korrelation der Parameter mit der Bewuchsart sollte immer in die Überlegungen einfließen.

Die in der Folge aufgeführten Parameter sollten in die Untersuchungen einfließen und für aussagekräftige Forschungsergebnisse beobachtet werden:

Niederschlagsmengen

Die Niederschlagsmengen sind für den Zustand des Wasserkreislaufes maßgeblich. Als Grundlage für die Dimensionierung des Rain Water Harvesting- Systems können die statistischen Werte der Niederschläge für den Standort (Bspw. Buttstedt) ausgewertet werden. Im weiteren Verlauf der Forschung sind die Niederschlagsmengen natürlich auch maßgeblich dafür, wieviel Wasser dem System überhaupt zugeführt werden kann.

Hierbei wäre es hinsichtlich der Sammelmöglichkeiten des Regenwassers interessant zu untersuchen, wieviel Prozent des Niederschlags auf die Panels treffen und wie man die Menge des auftreffenden Niederschlags beeinflussen kann.

Neben der Niederschlagsmenge soll auch der Einfluss der Windrichtung und der Windgeschwindigkeit evaluiert werden. Zu erforschen wäre auch das Verhalten des auftreffenden Regens in Kombination mit den technischen Konfigurationen der Anlage, z.B. der veränderlichen Winkelstellung der Panels, da sich diese Faktoren auf die Menge des gesammelten Wassers auswirken und sich gegenseitig beeinflussen können. (Elamri, 2018)

Der aufgetroffene und gesammelte Niederschlag könnte im Sammelbehälter, bzw. am Überlauf, gemessen werden und mit den Werten der Niederschlagsmengen des Referenzfeldes sowie mit den Wasserbedarfen der angebauten Kulturen verglichen werden. (Helmreich, Horn, 2008)

Verhalten von Niederschlägen im Untersuchungsgebiet

Um den praktischen Nutzen des Sammelbehälters zu untersuchen, gehört zur Grundlagenermittlung die Auswertung der Regendaten (täglich) im Bezug auf Regen- und Trockenperioden innerhalb der Kulturzeiten. Die Dimensionierung des Behälters sowie die aufgefangene Menge an Regen sind maßgeblich für die Landwirte, um eine bedarfsgerechte Bewässerung der Kulturen je nach Vegetationsphase zu ermöglichen. Zudem kann so das Potenzial zur Überbrückung von Trockenperioden erforscht werden, dass das Speichersystem bieten sollte. (Adeh, 2018)

Erosion

Die unterschiedliche physische Gestalt von PV-Systemen hat differenzierte Einflüsse auf die Art, wie das Regenwasser auf die Kulturflächen bzw. den Boden gelangt, sowie auf die flächenmäßige Verteilung des Niederschlags auf der Kulturfläche. (Rößner, 2022) Im Laufe des Forschungsvorhabens ist vorgesehen, die Erodierbarkeit des Bodens im Vergleich zur Referenzfläche nach fünf Jahren in einem Labortest zu untersuchen. Hierbei müssen auch Faktoren wie Bewuchsdichte, Kulturart und Bearbeitungsmechanismen berücksichtigt

werden, in deren Abhängigkeit die Erosionskorrelationen zu bewerten sind. Insbesondere ist zu testen, ob sich die Etablierung mehrjähriger Blühstreifen in den Aufständereihen auf Parameter wie Run-Off und Bodenerosion auswirkt.

Ein Vergleich des Erosionsverhaltens in Bezug auf abtropfendes, bzw. aufgefangenes Wasser wäre ebenfalls interessant. Dazu könnte an einem Teil der Anlage das Auffangsystem weggelassen werden, um den Einfluss des Tropfwassers auf Parameter wie Run-Off, Verschlammung und Erosion zu prüfen. (Feistel, Lux, 2023) Weiterhin wäre die Evaluation erosionsmindernder Bewässerungstechniken bzw. Ableitungen aus dem PV-System von Bedeutung, wobei auch diese mit der Bewirtschaftungsweise angepasst werden sollten.

Als Alternative zur Sammlung des Regenwassers wäre auch die Untersuchung von Möglichkeiten der Direktverregnung des auftreffenden Regenwassers von Interesse. Auch hierbei könnte der Einfluss auf die Erosion und den Run-Off zu dem von abtropfendem Wasser verglichen werden.

Evaporation

Die Evaporation ist im Hinblick auf immer extremer werdende Wetterverhältnisse vor allem im Sommer ein großer Faktor im Wasserkreislauf. Ein Teil der Untersuchungen könnte beinhalten, inwiefern sich der Effekt der Verschattung, der durch die APV-Anlage auf die Bodenoberfläche und das Mikroklima (Temperatur, Luftfeuchte, Wind) darunter wirkt, auch die Bodenevaporation beeinflusst. (Omer, 2022) Die Untersuchung des Mikroklimas unter der Anlage wird im Laufe des Projekts eine wichtige Rolle spielen, auch um die möglichen Veränderungen im Wasserkreislauf zu verstehen. Hierfür sind fortlaufende Messungen der Temperatur (auf drei verschiedenen Höhen), der Luftfeuchtigkeit (auf zwei verschiedenen Höhen), und der Windgeschwindigkeit (auf Blatthöhe) notwendig. (Al-agele, 2021) Durch die technische Ausführung der Anlage gibt es diverse Faktoren, die auf das Mikroklima und somit die Evaporation einwirken können: Die Winkelstellung der Module ist veränderlich und sorgt somit in Verbindung mit der jeweiligen Sonnenstellung für stetig veränderliche, beschattete Feldteile. Der Einfluss einer ‚anti-tracking‘ - Einstellung der Module, um Einstrahlung aber auch ggf. Wasserversorgung zu beeinflussen, kann geprüft werden. Zudem ist durch die Unterkonstruktion in Kombination mit dem Rain Water Harvesting-System mit zusätzlicher Verschattung zu rechnen. Die Evaporation kann mit Verdunstungskesseln untersucht werden, die so auf dem Feld platziert werden müssten, dass der Arbeitsablauf nicht gestört wird.

Transpiration

Mit der Untersuchung der Transpirationsrate in Bezug auf die durch die APV-Anlage erzeugte Verschattung ist es möglich, den Einfluss der Anlage auf den Wasserverbrauch der Kulturen zu erforschen. Auch die Beeinflussung korrelierender Umweltfaktoren wie Luftfeuchte, Temperatur und Luftbewegung sollte in die Untersuchungen einfließen. Die Kenntnis über möglicherweise veränderte Wasserbedarfe könnte dann langfristig auch in die Überlegungen zu Dimensionierung und Konstruktion der Wasserspeicherung und Bewässerung einfließen. Faktoren, die beachtet werden sollten, sind Art der angebauten Kultur, die Fläche der Verschattung in Abhängigkeit von Winkelstellung der Panels und Sonnenstellung, sowie mögliche Wechselwirkungen mit anderen Parametern wie Bodenfeuchteverteilung, Luftfeuchte und Temperatur im Pflanzenbestand. Die Transpirationsrate von Pflanzen kann mithilfe einer Transpirationswaage ermittelt werden. Zudem kann in diesem Zusammenhang in Zusammenarbeit mit den Pflanzenwissenschaftlern die Blattnässedauer gemessen werden,

die einen Einfluss auf den Befall mit Pflanzenkrankheiten und den Bedarf an Pflanzenschutzmitteln hat. (Feistel, 2022)

Bodenfeuchte

Für eine optimale Entwicklung der Kulturen und ein gutes Bodengefüge ist eine ausreichende Bodenfeuchte anzustreben. Da durch das APV-System und das Regenwassermanagement-System in Hinsicht auf Menge und Verteilung des Niederschlags großer Einfluss besteht, ist es naheliegend, die Bodenfeuchte im Vergleich zum Testfeld zu erproben. Dies kann mit Bodenhygrometern im Messsondencluster realisiert werden. Man kann davon ausgehen, dass auch die räumliche Verteilung der Bodenfeuchte durch die flächenmäßig teilweise Überdachung (Beschattung sowie Regensammlung) verändert wird. (Feistel, Kettner, 2022)

Um dies zu überprüfen, könnte man die Verteilung der Messsonden auf überdachte und unüberdachte Flächen realisieren, also unter und zwischen den Modulreihen, und so die Werte langfristig vergleichen. Die Ergebnisse könnten sehr hilfreich für die Installation des Bewässerungssystems, dessen Steuerung und die Überlegungen zur räumlichen Verteilung der Bewässerung sein. Mit dieser besteht dann die Option, eine möglicherweise ungleiche Bodenfeuchteverteilung auszugleichen und so die Effizienz der Bewässerung zu optimieren.

Die aufgeführten Untersuchungsschritte werden in den folgenden Tabellen nach Einflussfaktoren dargestellt:

	Umwelteinflüsse	Daten Umwelt	Technische Einflüsse	Daten Technisch	Einfluss auf
Menge Niederschlag insgesamt	- (Jahreszeit) - Wetter - klim. Bedingungen	- Niederschlagsmenge			- Bodenfeuchte - (Evapotranspiration) - Runoff
Menge Niederschlag aufgefangen	- Windrichtung - Windstärke - Tageszeit (Panels tracken Sonne)	- Niederschlagsmenge - Aufprallwinkel Regen	- Ausrichtung der Panels - Abstand der Panels - stetige Veränderung des Winkels durch Tracking - Dimensionierung der Regenrinnen - Dimensionierung Rohrsystem	- Fläche der Panels (qm) - Fläche des Versuchsfelds - (Fläche der Referenzfelds) - Anstellwinkel der Panels - Länge/ Durchmesser/ Gefälle Rinnensystem	- Bodenfeuchte (flach/tief) - Bodenfeuchteverteilung - Verschlämmung durch Abtropfen (bei unzureichender Ableitung) - Reinigung der Module
Menge Niederschlag durchgegangen	- Windrichtung - Windstärke - Tageszeit (Panels tracken Sonne)	- Niederschlagsmenge - Aufprallwinkel Regen	- Ausrichtung der Panels - Abstand der Panels - stetige Veränderung des Winkels durch Tracking - (Lücken zwischen einzelnen Panels)	- Fläche der Panels (qm) - Anstellwinkel der Panels - Abstand der Panels	- Bodenfeuchte (flach/ tief) - Bodenfeuchteverteilung - Runoff
Verdunstung gesamt	- klim. Bedingungen - Bewachungsgrad (Transpirationsrate) - Evaporationsrate	- Klimadaten (Temperatur, Windstärke, Luftfeuchtigkeit, Bodenart: Evaporationsrate) - Fruchtfolge/ Pflanzenmenge (Daten Transpiration)	- Verschattung durch Panels - Verschattung durch UK - Semitransparente Module	- Fläche der Panels - Anstellwinkel der Panels (Ausrichtung durch Tracking) - Abstand der Panels - Höhe der Aufständigung	- Bodenfeuchte - Luftfeuchtigkeit - Temperatur

Untersuchungszeitraum

Im Untersuchungszeitraum werden die Laborwerte (in der Regel aus Trockenmasse ermittelt) gegenüber den Feldmessmethoden verglichen. Die Messungen im Untersuchungsgebiet werden für die Auswertungen zu Grunde gelegt.

Messungen

Für den Bereich der Messungen zur Bestimmung der wassermanagementrelevanten Parameter sind unterschiedliche Versuchsanordnungen möglich, die innerhalb des Forschungsprojektes mit der Datenerhebung für die involvierten Fachdisziplinen abzustimmen und in der Auswertung querschnittsorientiert zu betrachten sind.

	Einfluss Verschattung	Einfluss Rain Water Harvesting	Einfluss auf	Quelle
Transpiration	-senkt Temp. im Pflanzenbestand? -Transpiration sinkt?	-verstärkt/ bzw. schwächt ab? -da Wasserhaushalt ausgeglichener	-Temp. -Luftfeuchte -Bodenfeuchte	Feistel, Kettner, 2022
Evaporation	-senkt Bodentemperatur? -weniger Verdunstung?	-Wasser wird System genommen, aber wieder zugeführt -kaum Einfluss?	-Temp. -Luftfeuchte	Feistel, Kettner, 2022
Bodenfeuchte	-weniger Verdunstung? -erhöht sich?	-sinkt unter den Panels?	-Pflanzenwachstum	Feistel, Kettner, 2022
Bodenfeuchte-verteilung	-ungleichmäßige Verdunstung?	-ungleichmäßige Beregnung?	-Gleichmäßiges -Pflanzenwachstum	Feistel, Lux, 2023
Temperatur	-sinkt?	-mglw. Wärmestau durch Panels?	-Wachstum -Verdunstung	Ullrich, 2023
Verschlämmung	-große Wassermassen trocknen langsamer ab?	-bei starken Regenereignissen hält RWH das Wasser davon ab, auf den Boden zu treffen -aber: entstehen Abtropfkanten ist Verschlämmungsgefahr groß	-Bodenqualität -Auswaschung v. Nährstoffen	Rößner, 2022
Runoff		-geringer, da weniger Niederschlag auf Feld landet	-Auswaschung -Materialverlust	Rößner, 2022
Sonnen-einstrahlung	-senkt -Semitransparente Module	-senkt, denn UK, Rinnen und Rohre geben Schatten	-Wachstum -Verdunstung -Energiegewinnung	Ullrich, 2023

Neben allen klimarelevanten Daten, die in der Regel in allen Messungen zu berücksichtigen sind, sind Verknüpfungen zu anderen Datenquellen bzw. deren Auswertung absehbar. Hierfür ist ein smartes, ggf. KI-basiertes Messsystem projektübergreifend zu entwickeln.

Für die Entwicklung und Auswertung der beschriebenen Fragestellungen könne folgende Messeinrichtungen vorläufig aufgeführt werden:

Wärme- und Wasserhaushalt des Bodens:	Temperaturfühler in verschiedenen Bodentiefen
Bodenerosion:	Messung des Bodenabtrags
Sickerwasser und Wasserspeicherung im Boden:	Bodenwassergehalt und Bodenfeuchte / Wasserspannung / nutzbare Feldkapazität in verschiedenen Tiefen
Versickerung:	Versickerungsraten in verschiedenen Bodentiefen
Run-Off:	Messungen unterschiedlicher Referenzflächen
Pflanzenverfügbares Wasser:	Hyperspektrale Erfassung des Wassergehalts

Die Messungen werden mit den bekannten Geräten wie Hygrometer, Tensiometer, Sensoren für Temperatur etc. ermittelt. Vor Ort Messungen werden parallel zu Laborwerten (z.B. Wassergehalt und Trockenmasse) ermittelt und gegenübergestellt.

Quellenverzeichnis

Adeh, E., Selker, J., Higgins, C. (2018): Remarkable agrivoltaic influence on soil moisture, micrometeorology and water-use efficiency, S 11-13. PLOS ONE
[https:// doi.org/10.1371/journal.pone.0203256](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0203256)

Rößner, J. (2022): Rainwater Management in Agrivoltaic Systems - Research and Development Potential. 8th World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, S. 996- 998. Fraunhofer Institut for Solar Energy Systems
https://www.ise.fraunhofer.de/content/dam/ise/de/documents/publications/conference-paper/wcpec-8/Roessner_4AO84.pdf&ved=2ahUKEwjYvLWywaaJAxWpxQIHHz06KGwQFnoECBUQAQ&usq=AOvVaw1wMXVIBWUncx1stWqUyPYv, abgerufen am 15.10.2024

Santra, P. (2020): Agri-Voltaic-System for Crop production and Electricity Generation from a Single Land Unit. Advances in Energy Research, Vol. 1, S. 45- 56. Springer Singapore
https://doi.org/10.1007/978-981-15-2666-4_6

Statistisches Bundesamt (2024): Pressemitteilung Nr. 186
<https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2024/05/>, abgerufen am 13.09.2024.

Thünen-Institut (2020): LAWAMAD - Landwirtschaftliches Wassermanagement Deutschland
<https://www.thuenen.de/de/institutsuebergreifende-projekte/lawamad-landwirtschaftliches-wassermanagement-deutschland-teilprojekt-c>, abgerufen am 13.09.2024.

Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (2023): Wetterstationskarte
Buttelstedt
<https://www.wetter-th.de/Agrarmeteorologie-TH/Wetterdaten/Stationskarte>, abgerufen am 13.09.2024.

Santra, P. (2018). Agri-Voltaic System: crop production and photovoltaic-based electricity generation from a single land unit. Indian Farming 68, 01. S. 20- 23
<https://epubs.icar.org.in/index.php/IndFarm/article/download/80411/33577/204260>, abgerufen am 15.10.2024

Bousi, E. (2024): Rainwater Harvesting in Agrivoltaic Systems. Fraunhofer ISE Lecture Series May 2024, S. 10-23. BayWa r.e. AG

Elamri, Y. (2018): Rain concentration and sheltering effect of solar panels on cultivated plots. Hydrology and Earth Science 22, S. 1285-1298. Copernicus Publications
<https://doi.org/10.5194/hess-22-1285-2018>

SolarPower Europe (2024): Tackling the Polycrisis, Agri-PV offers a win-win solution
<https://agrisolareurope.org/article/tackling-the-polycrisis-agri-pv-offers-a-win-win-solution/>, abgerufen am 8.10.2024.

Helmreich, B.; Horn, H. (2008): Opportunities in rainwater harvesting. Desalination, S. 118- 124. Elsevier B.V.

<https://doi:10.1016/j.desal.2008.05.046>

Feistel, U., Lux, G. (2023): 6 Jahre Forschung zum Einfluss von PV- und APV- Anlagen an der HTW Dresden. Agri-Photovoltaik Forum Sachsen 2023

Omer, A. (2022) Water evaporation reduction y the agrivoltaic systems development. Solar Energy, S. 13- 23. Elsevier Ltd.

<https://doi.org/10.1016/j.solener.2022.10.022>

Al-agele, H. (2021): A Case Study of Tomato- Production and Water Productivity in Agerivoltaic Systems. Sustainability 2021, 13, 2850, S. 1- 13. MDPI

doi.org/10.3390/su13052850

Feistel, U. (2022): Assessing the impact of shading by solar panels on evapotranspiration and plant growth using lysimeters. AIP Conference Proceedings 2635, 150001, S. 2- 6. AIP Publishing

<https://doi.org/10.1063/5.0103124>

Feistel, U.; Kettner, S. (2022): Wie PV-Freiflächen den Bodenwasserhaushalt verändern - Begleitforschung im größten Solarpark Deutschlands. Forum für Hydrologie und Wasserbewirtschaftung, Heft 43.22, S. 43- 52

<https://doi.org/10.14617/for.hydrol.wasbew.43.22>

Ullrich, S. (2023): Solar power from fields - dual usage of agricultural land. PV for agriculture - special 2023.

<https://www.pveurope.eu/agriculture/download-free-special-edition-dual-use-land-new-special-agri-pv>, abgerufen am 8.10.2024.

Gutachten zur Eignung von Ackerkulturen in Agri-Photovoltaik Anlagen

Prof. Dr. Kerstin Wydra, mit Leon Hoffmann, Mustafa Bensfia, Janina Happ

Für Ackerkulturen in Kombination mit Photovoltaik gibt es drei wesentliche Restriktionen zu beachten: der Einfluss auf die Erträge durch die Anlage, die Fruchtfolge und die zur Verfügung stehenden Ackergeräte für die Bodenbearbeitung, sowie Pflege und Ernte für die spezifische Kultur. Basierend auf einer Literaturrecherche über mehrere Jahrzehnte, wird im Folgenden der Einfluss auf den Ertrag sowie teilweise auch auf die Qualität von Ackerkulturen unter Agri-Photovoltaik eingegangen. Dabei werden auch Ergebnisse aus Verschattungsversuchen oder aus der Agroforstwirtschaft herangezogen, die Hinweise zum Verhalten der Kulturen unter Beschattung geben. Diese Ergebnisse sind allerdings nur bedingt auf die APV zu übertragen, da die positiven Effekte in Bezug auf Änderung des Mikroklimas und auf die Bodenfeuchte sowie Schutz vor Wetterextremen hier nicht beachtet werden. Da für viele Ackerkulturen noch keine (mehrjährigen) Ergebnisse aus APV Versuchen vorhanden sind, geben die Ergebnisse auf Verschattungsversuche Hinweise und Trends für eine Eignung von Pflanzen, müssen aber immer unter Beachtung der zu erwartenden Wetterextreme betrachtet werden. Mit dem Klimawandel werden Starkwetterereignisse häufiger, und damit die Schutzwirkung der APV relevanter, wodurch etwaige Mindererträge durch Verschattung ausgeglichen werden können.

Aufgrund von unterschiedlicher Aufständerrung und Lichtdurchlässigkeit der Module, verbunden mit verschiedenen Verschattungsgraden bzw. PAR, mit daraus folgenden, variablen Schutzwirkungen, in Kombination mit den Witterungsbedingungen in verschiedenen Jahren und Regionen sind die Ergebnisse in der Literatur bezüglich der Erträge der Kulturpflanzen sehr variabel. Zum Verständnis sind vorab folgende Erklärungen notwendig:

- *Residual (Rest) PAR: Verhältnis der durchschnittlichen photosynthetisch aktiven Strahlung über die gesamte Anbaufläche (integriert für den Anbauzyklus unter APV-Bedingungen) zu der Menge verfügbarer PAR in einer unbeschatteten Referenzfläche*
- *die Reduktion der Globalstrahlung in APV System wird mehr durch die Transparenz der Module (29.5% bzw. 13.4% für doppelte Dichte und einfache Dichte) als durch Unterschiede im Management bzw. der Steuerung (statisch oder sun-tracking) bestimmt*
- *Ground cover ratio (Flächenbedeckungsrate): 45% GCR entspricht 50%, Verschattung, 20% GCR 25% Verschattung (abh. von Modultyp)*
- *Werte von GCRs bis 25% werden für APV Systeme mit statischen oder mobilen Modulen empfohlen. Höhere GCR bis 35% sind möglich, insbes. wenn, je nach Kultur, ein anti-tracking in Betracht gezogen wird*
- *in einem bodennahen Tracking-System wurde ein spezifischer, elektrischer Ertrag von 1245 kWh/kWp mit einer residual PAR von $73 \pm 5\%$ erzielt (Belgien).*

In einer Studie in UK wurde in einer Simulation mit den Hauptanbaukulturen im Ackerbau immer ein positives, also profitables Ergebnis in Bezug auf Flächennutzung an allen Standorten erzielt (Garrod et al. 2024).

Es spielen die Anbaukulturen und die Fruchtfolge, aber auch die Sortenwahl eine ausschlaggebende Rolle, z.B. schattentolerante (Weizen-) Sorten erzielen bessere Erträge unter Beschattung. Bezüglich Auswahl der Kulturen und der Fruchtfolge können aufgrund der

vielfältigen Einflussfaktoren nur Einschätzungen über die Bandbreite an Reaktionen der Kulturen im Ertrag und ggf. Qualität abgegeben werden.

Die meisten Ackerkulturen produzieren bei bis 30% Verschattung selten Ertragsverluste über 34%. (Bezug zu DinSpec 91434, s. Haupttext des Konzeptes). Einige Kulturen profitieren von der Verschattung, bzw. auch vom Schutz der Module, wenn *unter* den Modulen angebaut. Dies ist insbesondere abhängig von der Witterung (Extremwetterereignisse) und von Trockenheitsperioden, in denen mehr Schutz durch die Module eventuelle Ertragsminderungen durch Verschattung ausgleicht. Bei hoch aufgeständerten Modulen wurde neben einer höheren Bodenfeuchtigkeit auch eine Temperaturminderung unter den Modulen festgestellt, die in Hitzeperioden ertragssteigernd gegenüber dem Referenzbestand wirkt.

Eine Beurteilung allein des Ertrages ist ökonomisch nicht sinnvoll, wenn z.B. ein beobachtet, erhöhter Proteingehalt oder andere Qualitätskriterien einen höheren Verkaufserlös oder Futterwert erbringen.

Eine Meta-Analyse zur Ertragsentwicklung von Agri-Photovoltaik-Anlagen unter Verschattungsbedingungen zeigen eine hohe Variabilität der Ergebnisse. Neben dem Verschattungsgrad beeinflussen Umweltbedingungen, Anbauverfahren, Sortenwahl und technische Anlagenparameter die Erträge signifikant. Dies wird für verschiedene Ackerkulturen in diesem Bericht ausgeführt. Außer der Umweltbedingungen sind allerdings die Faktoren großteils so anpassbar bzw. so optimierbar, dass ein Ertragsverlust begrenzt bzw. auch ggf. ein Ertragsgewinn erzielt werden kann.

Ein rein auf eine Verschattungswirkung (ohne die Vorteile der APV) bezogene Evaluierung ergibt folgendes Bild (Abb. 1):

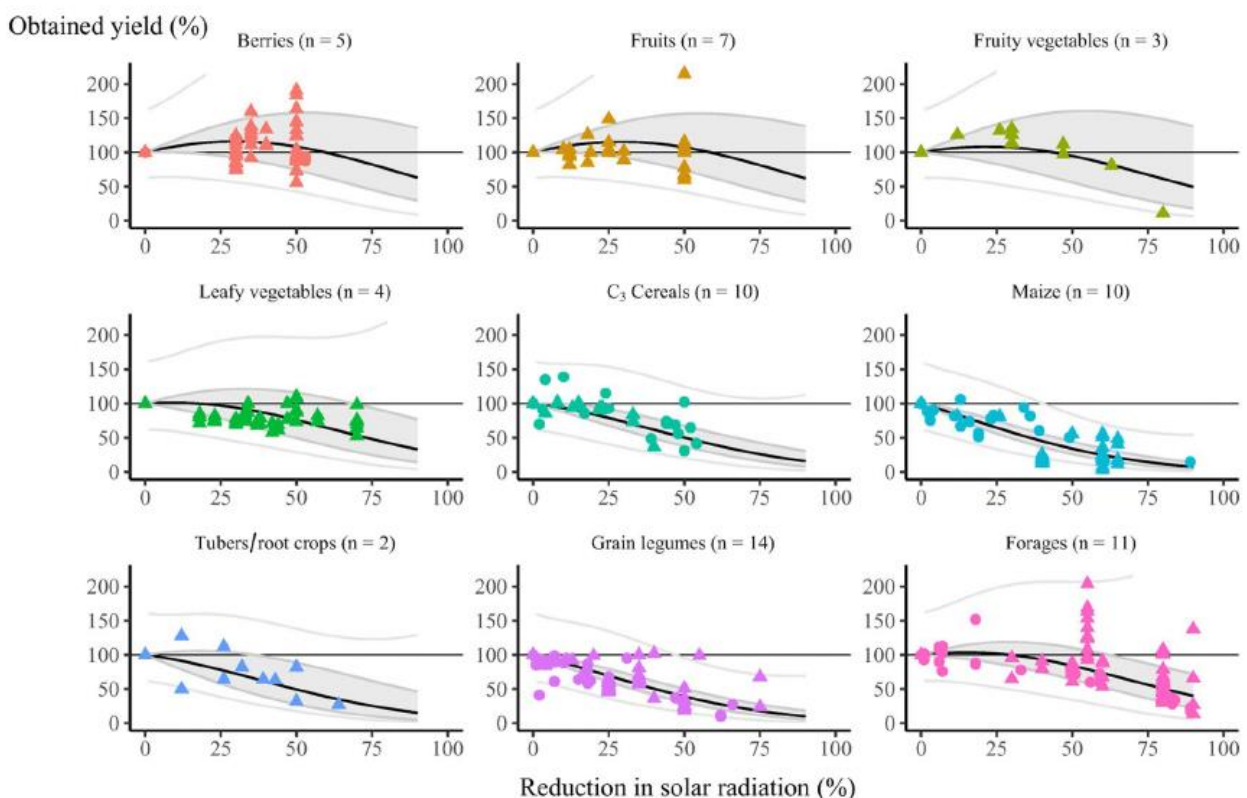


Abb. 1: Einfluss von Schatten auf den relativen Ertrag verschiedener Kulturen (Laub et al. 2022)

Anpassungsmaßnahmen:

Modulanordnung und -steuerung

- zeitweises ‚antitracking‘ je nach Kultur in Zeiten eines erhöhten Lichtbedarfes (z.B. Kornfüllungsphase), unter Berücksichtigung des positiven Effektes einer Temperaturminderung unter/neben Modulen
- Modultransparenz nach Bedarf der Kulturen wählen
- bei Starkregen ggf. Vertikalstellen der Module zum Verhindern von Erosion durch Abfluss von Abtropfkante
- Regenwasserauffangrinnen, ggf mit Verteilung
- je nach Modulanordnung, -steuerung und Reihenabstand sind Ertragsunterschiede bei unterschiedlicher Beschattung zu erwarten

Kulturwahl (s.a.u.)

- Untersaaten sind zu empfehlen, um Wassererosion an der Abtropfkante zu verhindern

Sortenwahl

- schattentolerante (Weizen-) Sorten zeigten höhere Ertrag unter APV.

Forschungsergebnisse und Fazit zur Eignung der Kulturen für APV

Es wurde insbesondere auf die in Thüringen hauptsächlich angebauten Ackerkulturen fokussiert, hier am Beispiel der Anbaukulturen des TLPVG.

Auflistung Kulturen des TLPVG

Winterweizen	Wintergerste	Winterraps	Sommergerste
Erbse	Ackerbohne	Sojabohne	Weißer Lupine
Hafer	Zuckerrübe	Mais	Sonnenblume
Luzerne	Ackerfutter	Gemenge Futter	Roggen
Dinkel bis 2021	Öllein bis 2021		

Die Variabilität der Ergebnisse an verschiedenen Standorten bzw. aus diversen Publikationen werden im Folgenden dargestellt:

Weizen, Dinkel

Verschattung 19%: Ertragsanstieg

Verschattung 22% oder 33%: Ertragsverlust

Verschattung 43%: 25% Verlust

Verschattung 44%: 27-30% Verlust

Verschattung 50%: 20% Ertragsanstieg

Verschattung 61%: 45% Verlust

Verschattung 27% (hoch aufgeständert): 33-46% Verlust (aber: 2% höherer Proteingehalt) (Dong et al. 2019)

Verschattung 35% (hoch aufgeständert): 34% Verlust

Verschattung 37,5% (hoch aufgeständert): keine signifikanten Verluste über 4 Jahre

Verschattung n.b.: 8%, 19% Ertragsverlust

Verschattung 33%: 46% Ertragsverlust, 2% höherer Proteingehalt (Reher et al. 2024, Dong et al. 2019)

Verschattung 44%: 27%-30% Ertragsverlust (Lazaro et al. 2010)

Verschattung n.b.: keine signifikanten Differenzen (Pataczek et al. 2023), Biomasseanstieg über 2 Jahre (Weselek et al. 2021)

Verschattung (APV Anlage bodennah, tracking, Reihenabstand 14 m): Ertrag immer über 70% zu Referzertrag über 3 Jahre (Weizen, Dinkel) (Skudelny und Zapfe 2024).

Schattentolerante Sorten: 50% höhere Erträge als Referenzsorte, oder höherer Ertrag bei bis zu 77% und 85% Beschattung, insgesamt Ertragserhöhung gegenüber anderen Sorten unter Verschattung (bei Verschattung weniger Verlust, 6,4%, 16,2% als nicht tolerante Sorten mit 9,9%, 25,8%) (Li et al. 2010).

Erntezeitpunkt: Drusch könnte bei unterschiedlicher Abreife zeitlich nach hinten verschoben werden.

Qualität: Eine Beurteilung allein des Ertrages ist ökonomisch nicht sinnvoll, wenn z.B. ein beobachtetet, erhöhter Proteingehalt des Weizens (Dong et al. 2019) einen höheren Verkaufserlös erbringt.

Literatur Weizen:

Beed et al. 2007, Dupraz et al. 2010, Lazaro et al. 2010, Li et al. 2010, Mu et al. 2010, Dupraz et al. 2011a, 2011b, Marrou et al. 2013a, 2013b, Artru et al. 2017, Arrenas-Corraliza

et al. 2019, Dong et al. 2019, Weselek et al. 2021, Arrenas-Corraliza et al. 2021, Laub et al. 2022, Wydra et al. 2022, Dupraz et al. 2023, Pataczek et al. 2023, Yeligeti et al. 2023, Garrod et al. 2024, Reher et al. 2024, Skundelny und Zapfe 2024, Widmer et al. 2024.

Fazit: Weizen und Dinkel sind geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Hafer

Kein signifikanter Ertragsrückgang bis 50% Verschattung.

Literatur Hafer:

Wiggans 1959, Garrod et al. 2024, Skundelny und Zapfe 2024.

Fazit: Hafer ist geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Luzerne (alfalfa)

Verschattung von 56-59%: Biomasseverlust von 20-25%, Neuseeland (Varella et al. 2011)

Verschattung 45%: kein Biomasseverlust, USA (Towner et al. 2022)

Verschattung n.b.: 1,4-fache Erhöhung der Biomasse unter APV, Frankreich (Edouard et al. 2021).

Literatur Luzerne:

Varella et al. 2011, Towner et al. 2022, Edouard et al. 2023, Zhang et al. 2024.

Fazit: Luzerne ist geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Gerste

Verschattung bis zu 50%: Ertragsanstieg bis zu 19%, Spanien (Arrena-Corraliza et al. 2019, 2021).

Literatur Gerste:

Arenas-Corraliza et al. 2019, Laub et al. 2022, Vaccaro et al. 2022, Wydra et al. 2022, Yeligeti et al. 2023, Campana et al. 2024.

Fazit: Gerste ist geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Ackerfutter, Gemengefutter

Verschattung 20%: 3% Ertragsanstieg

Verschattung 40%: 7% Ertragsverlust (Pang et al. 2017, Laub et al. 2022)

Verschattung 38%: Ertragsverlust 6-7% (Weidelgras) Erhöhung des Energie- und Proteingehalts sowie Bodenfeuchtigkeit (Kannenbergh et al. 2023, Sturchio et al. 2024).

Eine bis zu 600-fache Erhöhung des Profits über 30 Jahre ist bei Weidelgras möglich (Campana et al. 2024). Je nach Artenzusammensetzung sind Futtergemenge zum Teil besonders geeignet und erbringen einen höheren Ertrag als im Referenzfeld (Abb. 2) USA (Towner et al. 2022).

Biomasseerhöhung Futterpflanzen unter Schatten

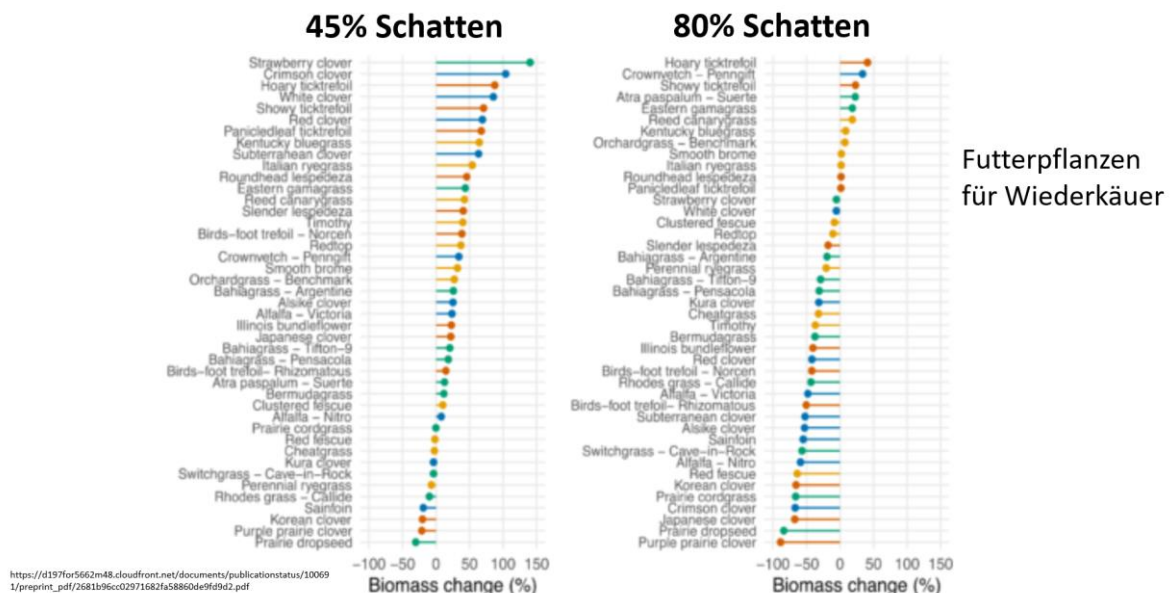


Abb. 2: Biomasseveränderung von Futterpflanzen unter 45% und 80% Verschattung (Towner et al. 2022)

Literatur Gemengefutter:

Varella et al. 2011, Amaducci et al. 2018, Weselek et al. 2021, Laub et al. 2022, Kannenberget al. 2023, Sturchio et al. 2024.

Fazit: Ackerfutter ist geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Ackerbohne

Verschattung, steigend: Ertragsverluste möglich, aber verbesserte Wasserversorgung bedeutend; Körnerleguminosen reagieren mit Ertragsverlust auf Verschattung

Literatur Ackerbohne:

Bradford et al. 1977, Nasrullahzadeh et al. 2007, Wydra et al. 2022, Garrod et al. 2024.

Fazit: bedingt geeignet für den Anbau in APV Anlagen, besonders in trockenen Jahren.

Roggen

Verschattung 21%: kein Einfluss auf Ertrag; 2 Ernten hatten gleichen Ertrag wie in Referenz (Jo et al. 2022)

Literatur Roggen:

Jo et al. 2022, Wydra et al. 2022, Yeligi et al. 2023.

Fazit: Roggen ist geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Raps

Verschattung 27%-50%: Ertragsverluste 30-43%

Verschattung 43% bei Blüte: keine signifikante Biomasseverringering (13%); Blattalterung in Winterraps verzögert

Verschattung (n.b.): kein signifikanter Ertragsverlust bei Verschattung; Schatten vor Blüte negativ

Literatur Raps:

Brunel-Muguet et al. 2013, Rondanini et al. 2014, Campana et al. 2021, 2022, Yeligeti et al. 2023, Asaa et al. 2024, Garrod et al. 2024.

Fazit: bedingt geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Zuckerrübe

Verschattung 18-25%: Ertragsverlust von 0-19% (Reher et al. 2024)

Verschattung 50%: Ertragsverluste bis 55%, Zuckergehalt verringert sich, oder bleibt erhalten (Zuckergehalt pro g Trockengewicht)

Verschattung steigend: steigende Ertragsverluste (Artru et al. 2018)

Verschattung: keine signifikanten Ertragsverluste, aber geringerer Zuckergehalt im Agroforstsystem (Watson et al. 1972).

Die Differenzen zwischen den Jahren in Ertrag und Zuckergehalt sind höher als zwischen APV und Referenz. Kein Unterschied zwischen Mitte der APV Reihen und Referenz. (Reher et al. 2024). Ertragsverluste in APV geringer als bei Weizen, Qualitätssteigerung wurde beobachtet (Tsialtas & Maslaris 2012).

Literatur Zuckerrübe:

Watson et al. 1972, Tsialtas et al. 2012, Artru et al. 2018, Wydra et al. 2022, Yeligeti et al. 2023, Garrod et al. 2024, Reher et al. 2024.

Fazit: Zuckerrüben sind bedingt geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Soja

Verschattung 21%: Ertragsverlust 30%

Verschattung 30%: Ertragsverlust 10%; Ertragsverlust 32%

Verschattung 50%: Ertragsverlust 50%

Verschattung ohne Einfluss in einem Jahr, Verlust im nächsten Jahr (Jo et al. 2022)

Literatur Soja:

Jo et al. 2022, Lee et al. 2022, Yeligeti et al. 2023, Garrod et al. 2024, Widmer et al. 2024.

Fazit: Soja ist bedingt geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Mais

Verschattung 29,5%: Ertragsanstieg bei Trockenheit, unabhängig vom Tracking-Management (Amaducci et al. 2018)

Verschattung 50%: negativerer Effekt während Blüte und Kornfüllungsphase als bei vegetativem Wachstum (Reed et al. 1988, Liu & Tollenar 2009)

Verschattung <60%: Ertragsverlust 36%, wenn Verschattung während der ganzen Entwicklung (Cui et al. 2015)

Verschattung gering: Ertragsanstieg 6%, Stabilisierung und Erhöhung bei Trockenheit (Amaducci et al. 2018)

Verschattung gering: 4,9% und 5,6% Ertragsanstieg in Biomasse / Körner Ertrag in Japan , 14-29% Wasserersparnis (Sekijama & Nagashima 2019)

Literatur Mais:

Reed et al. 1988, Liu et al. 2009, Cui et al. 2015, Amaducci et al. 2018, Sekiyama und Nagashima 2019, Kim et al. 2021, REM Tec 2022, , Wydra et al. 2022, Dupraz 2023, Ramos-Fuentes et al. 2023, Yeligeti et al. 2023, Garrod et al. 2024, Skundelny und Zapfe 2024.

Fazit: Mais bedingt geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Erbse, Lupine, Rote Bohne, Ackerbohne

Verschattung 18%, 48%: kein signifikanter Ertragseffekt bei Ackerbohne (sortenabhängig) (Nasrullahzadeh et al. 2007)

Verschattung 21%: Ertragsverlust 26% bei Roter Bohne (Lee et al. 2022)

Verschattung 25%: 14% Ertragsverlust bei Hülsenfrüchten (Laub et al. 2022)
Verschattung 50%: 35%-50% (Laub et al. 2022)

Verschattung steigend: Ertragsverlust steigt (Ackerbohne) (Sprent et al. 1977)

Verschattung n.b.: kein Verlust bei Roter Bohne in APV (Jo et al. 2022)
Verschattung n.b.: Körnerleguminose reagiert mit Ertragsverlust

Verschattung: Erbse eher nicht geeignet (Akhter et al. 2009, Blanchet et al. 2022, Wydra et al. 2022, Yeligeti et al. 2023)

Verschattung: Lupine eher nicht geeignet (Mantino et al. 2021, Yeligeti et al. 2023)

Literatur Leguminosen:

Sprent et al. 1977, Nasrullahzadeh et al. 2007, Akhter et al. 2009, Mantino et al. 2021, Blanchet et al. 2022, Jo et al. 2022, Laub et al. 2022, Lee et al. 2022, Wydra et al. 2022, Yeligeti et al. 2023.

Fazit: bedingt geeignet für den Anbau in APV-Anlagen.

Sonnenblume

Verschattung, gering: positiv bei Trockenheit (Correira et al. 2006)

Verschattung, n.b.: Ertragsverminderung, abhängig von Entwicklungsphase, besonders in Blütenphase (*Cantagallo et al. 2004*)

Literatur Sonnenblume:

Cantagallo et al. 2004, Correira et al. 2006, Lindström et al. 2006, Wydra et al. 2022, Yeligeti et al. 2023.

Fazit: eher nicht geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Kartoffel

Verschattung bis 26%: kein Ertragsverlust (Schulz et al. 2019)

Verschattung 26%: 53% Ertragsverlust

Verschattung 34%: 15-20% Kartoffelertragsverlust bei partieller Verschattung, 30-40% bei Verschattung für ganze Saison (Sale 1976)

Verschattung 50%: Ertragsverlust 19-44-69% (Schulz et al. 2019)

Verschattung, n.b.: Keine Ertragsminderung bei Kartoffel (Lee et al. 2022)

Verschattung, n.b.: Geringe Ertragsminderung oder Ertragssteigerung (Weselek et al. 2022)

Literatur Kartoffel:

Sale 1976, Schulz et al. 2019, Lee et al. 2022, Weselek et al. 2022.

Fazit: Kartoffel ist geeignet für den Anbau in APV Anlagen.

Öllein

Keine Daten.

Eine erste Abschätzung der Eignung in der Fruchtfolge wäre:

Weidelgras > Roggen, Gerste, Hafer, Weizen > Luzerne > Soja > Ackerbohne > Erbse.

Literaturverzeichnis

Die verwendete Literatur dieses Gutachtens findet sich im Haupt-Literaturverzeichnis des Agri-PVThue Konzeptes

Boden- und Klimamonitoring im Kontext von Agriphotovoltaik (APV) Anlagen

Prof. Dr. Björn Machalett

1. Empfehlungen für ein Boden- und Klimamonitoring im Kontext von Agriphotovoltaik Anlagen in Thüringen

Ein belastbares und übertragbares Boden- und Klimamonitoring, das es ermöglicht die bebaute Fläche und eine Kontrollfläche sowohl im Ausgangszustand und nach einer Nutzungsdauer von z. B. 5-10 Jahren zu vergleichen, benötigt Informationen über grundsätzliche Standortparameter. Hierzu zählen Relief, Geologie (in Hinblick auf die Bodenbildung) und Geländeexposition. Diese Parameter können zuverlässig über ein Digitales Geländemodell (mindestens Auflösung 1 m, ideal bei kleineren Anlagen 20 cm) und ein Digitales Oberflächenmodell, Informationen aus der Geologischen Karte (1:25.000, GK25), Digitale Orthophotos und die Verarbeitung dieser Daten in einem Geoinformationssystem (z. B. QGIS oder ArcGIS) ausgewertet werden. In der vorliegenden Literatur wurden diese Parameter meist nur sehr grob betrachtet, teilweise waren die einzelnen APV- oder PV-Anlagen zu klein, aber selbst hier sind diese Informationen bisher nicht leicht zugänglich bzw. sind noch nicht veröffentlicht oder wurden nicht berücksichtigt (vgl. Forschungsprojekt APV-RESOLA, Agriphotovoltaikanlage Heggelbach, <https://agri-pv.org/>). In der bisherigen Begleitforschung fehlen solche Aussagen zur Geologie, zum Relief und zur Exposition fast vollständig. Ähnliches gilt für den vorhandenen Bodentyp und die Bodenart am Standort von APV- oder PV-Anlagen. In den vorliegenden Studien wurden zwar umfangreiche Bodenparameter erhoben, aber die Grundaussage zum Bodentyp fand auf der Ebene der Landeskartierung statt (was in Deutschland ein Maßstab von 1:50.000 bzw. 1:100.000 bedeutet), ohne eigene Bodenkartierungen am Standort. Die Bodenart wurde nur für die 3 Hauptbodenarten mit traditionellen, gering auflösenden Messverfahren erhoben, was einen Vergleich von Kontrollfläche und Testfläche nach kurzer Nutzungsdauer fast unmöglich macht, da die Unsicherheit der Methodik potentiell größer ist, als die möglichen Veränderungen in kurzen Zeiträumen. Diese grundlegenden Informationen zum Boden sind unerlässlich, unabhängig der Größe der APV-Anlagen (z.B. Heggelbach 2500 m² innerhalb 2,5 ha Grundfläche oder auch größere Anlagen mit APV-Flächen ab 10 ha).

Basierend auf den vorliegenden Studien zu PV- und APV-Anlagen und mit Bezug auf die notwendigen Parameter für ein belastbares und übertragbares Monitoring empfehle ich folgende Vorgehensweise:

1. Kartierung der Standortverhältnisse

- a. Relief, Geologie (in Hinblick auf die Bodenbildung) und Geländeexposition.
- b. Übertragung dieser Parameter in ein Digitales Geländemodell (DGM, mindestens Auflösung 1 m, ideal bei kleineren Anlagen 20 cm) und ein Digitales Oberflächenmodell (DOM), Informationen aus der Geologischen Karte (1:25.000, GK25), Digitale Orthophotos und die Verarbeitung dieser Daten in einem Geoinformationssystem (z. B. QGIS oder ArcGIS); bei DGM/DOM wird zusätzliche Software zur Verarbeitung der Rohdaten benötigt (in Thüringen Verarbeitung der laz-Rohdaten z. B. mit Golden Software Surfer Version 27).
- c. Grundsätzlich wird für eine Demonstrationsanlage empfohlen, die sich auch zum Monitoring und zur wissenschaftlichen Begleitforschung eignet, eine möglichst homogene Standortsituation auszuwählen, mit wenig Veränderungen im Relief, der Geologie, der Exposition und idealerweise mit homogenen Bodenverhältnissen. Hierzu wird neben Schritt 1b eine eigenständige Bodenkartierung durch erfahrene Bodenkundler/Standortkartierer empfohlen, die die ausgewählte Fläche sowohl im Raster als auch nach Qualitätskriterien erfassen. Starke Wechsel im Bodentyp und der Bodenart werden ein nachgeschaltetes Monitoring und eine Interpretation der Daten sehr erschweren und sollten für eine solche Forschungsanlage vermieden werden. Großflächige Flächen mit besonders schutzwürdigen Böden (z.B. Schwarzerden auf Löss im Thüringer Becken) sollten auch, angesichts der unbekannten Ergebnisse des Monitorings, vermieden werden. Ohne konkrete Standortvorschläge zu kennen, dürften sich in der Thüringer Agrarlandschaft vor allem ebene Standorte auf Flächen des Muschelkalks (möglichst ohne Lössbedeckung) oder des mittleren Buntsandsteins eignen.
- d. Bei der Bodenkartierung sollten bereits Referenzstandorte festgelegt werden, die durch eine Bodenprofilgrube erfasst werden und in denen Bodenproben in hoher Auflösung genommen werden, so dass der Ausgangszustand dokumentiert werden kann. Hier bietet AGRIPV-THUE eine ideale Ausgangsposition, die in der bisherigen internationalen Begleitforschung zu PV- und APV-Anlagen nicht wahrgenommen werden konnte.

2. Aufbau der Boden- und Klimamonitorings

- a. Je nach Anlagengröße sind sowohl auf einer unbebauten Kontrollfläche (bei großflächigen Anlagen auf mehreren Kontrollflächen), auf der bebauten Kontrollfläche

und insofern möglich auf Kontrollflächen mit unterschiedlichen Landnutzungstypen (Acker, Wiese, ggf. auch Wald oder Agroforst) jeweils mindestens 4 Referenzstandorte (bezogen auf eine APV-Anlage mit 1 ha Größe) festzulegen, bei denen eine detaillierte Beprobung zu Beginn des Monitoring und am Ende stattfindet und an denen kontinuierlich ein Bodenklimamonitoring stattfindet. Bei großflächigen Anlagen oder heterogenen Standortverhältnissen ist die Zahl der Referenzstandorte zu erhöhen (eine pauschale Empfehlung ist hier schwierig, aber ca. jede Verdopplung der Anlagengröße sollte mit ca. 50 % mehr Untersuchungsstandorten erfasst werden bzw. sich an den Empfehlungen aus der Bodenkartierung orientieren). Gerade bei großflächigen APV-Anlagen kann dadurch der Gradient vom Außenbereich zum Innenbereich erfasst werden. Zwischen den Hauptreferenzstandorten kann eine Beprobung mittels Bohrstock erfolgen. Eine Zusammenfassung der jeweiligen Referenzstandorte mittels Mischproben wird ausdrücklich nicht empfohlen, da die Aussagequalität damit signifikant sinkt.

- b. An den Referenzstandorten werden Bodenprofilgruben angelegt, kartiert, dokumentiert und Bodenroben für physikalische, chemische und biologische Bodenuntersuchungen entnommen. Hier ist eine Beprobungsauflösung von 1 cm für Bodenphysik und alle 5 cm für Bodenchemie und Bodenbiologie empfohlen. Die Referenzstandorte dienen auch der mikroklimatischen Untersuchung des Bodens. Außerhalb der Profilgruben, aber in unmittelbarer Nähe können Messinstrumente zum Bodenklima eingebracht werden und an ausgewählten Referenzstandorten sollte eine autonome automatische Klima- und Wettermessstation aufgebaut werden, die mit den Messinstrumenten zum Niederschlagsmonitoring und zum Bodenklima in einem Messnetz verbunden ist. Mindestens zwei Klimastationen sind empfehlenswert – außerhalb und innerhalb der APV-Anlage, bei größeren Anlagen und Anlagen mit stärkeren Reliefunterschieden ggf. 1-2 Klima-Messpunkte mehr.
- c. Folgende Parameter werden für ein umfassendes Boden- und Klimamonitoring innerhalb von Agri-PVThue empfohlen. Die Menge an Messstandorten sollte in Abhängigkeit der Anlagengröße skaliert werden. Ein Großteil der Analysen wäre im bodenphysikalischen Labor der FH Erfurt realisierbar, bodenchemische Analysen im Bodenlabor der TLLR und bodenbiologische Analysen sollten im Rahmen von Kooperationen durch das Labor der FKG an der FH Erfurt durchführbar sein.

Bodenphysikalisch:

- Bodenart mit 1 cm Beprobungsauflösung für Bestimmung mittels Laserdiffraktometrie (Feinboden Messauflösung mindestens 136 Klassen bis 2000 µm), ergänzt um Messungen der Korn- und Aggregatform zur Überprüfung bodenpyhsikalischer Destabilisierung
- Bodenwassergehalt + Infiltrationskapazität + Eindringwiderstand
- Feldkapazität (nFK und Gesamt)
- Trockenrohdichte
- mittlere Durchmesser wasserstabiler Aggregate (MWD)
- magnetische Suszeptibilität
- Bodenfarbe in hoher Auflösung als einfacher Parameter für Verwitterung und Organikgehalt
- Kationenaustauschkapazität
- elektrische Leitfähigkeit

Bodenchemisch:

- pH-Wert
- Kohlenstoffgehalt
- Stickstoffgehalt
- Kalkgehalt
- Anteil Kohlenstoff im Kalkanteil und Anteil gebundener anorganischer Stickstoff.
- Phosphorgehalt

Bodenbiologisch:

- Bodenrespiration (BR)
- mikrobielle Biomasse (MB)
- Enzymaktivität (Fluorescein-Diacetat-Hydrolase, Tyrosinase, Phosphatase)
- metabolische Quotient (qCO₂)
- außerdem wäre ein umfangreiches biologisches Screening nach Moscatelli et al. (2022) empfehlenswert, insofern hierfür Labor- und Analysekapazitäten verfügbar sind

Bodenklima in verschiedenen Tiefen:

- Bodentemperatur
- Bodenfeuchte
- Bodenatmung

Standortklima in verschiedenen Höhen (aufgrund der Höhe der APV-Anlagen):

- Temperatur
- Luftfeuchte
- Niederschlag
- Windgeschwindigkeit
- Windrichtung
- Luftdruck
- Globalstrahlung
- Photosynthetisch aktive Strahlung

Zur Messung des Bodenklimas und zur Messung des Standortklimas an den Referenzstandorten wird z. B. ein Messnetz des Herstellers Onset HOBO, USA oder ein vergleichbares System anderer Hersteller empfohlen. Dieses System kann in einem Feld-Monitoring-System sowohl Klimamessstationen als auch Bodenmesssensoren einbinden. An den Referenzstandorten werden zur Messung der Bodenfeuchte Multilevel Bodenfeuchtesensoren empfohlen. An weiteren Standorten können kostengünstige TOMST TMS-4 Datenlogger für Bodenfeuchte und Temperatur verwendet werden.

Der gesamte Aufbau des vorgeschlagenen Boden- und Klimamonitorings ist skalierbar und an die Größe der Forschungs-APV-Anlage anpassbar. Grundlegende Parameter zur Bodenphysik, Bodenchemie und Bodenbiologie sollten stets enthalten sein, da bisherige Studien vor allem hier Änderungen unter klassische PV-Modulen festgestellt haben. Eine klimatologische Begleitung ist ebenfalls unerlässlich, da nur dadurch Rückschlüsse auf die möglichen Einflussgrößen möglich sind.

Innovativ und klärend für den internationalen Forschungsstand wäre ein zusätzliches Monitoring auf per- und polyfluorierte Alkylsubstanzen (PFAS, Polytetrafluorethylen, PTFE, Teflon-Fluorpolymere). Die Probengewinnung könnte hierfür z. B. im Rahmen der Beprobung für bodenchemische Analysen mit durchgeführt werden und sich auf die Referenzstandorte beziehen.

Verwendete Literatur:

- Armstrong, A., Ostle, N.J., Whitaker, J., 2016. Solar park microclimate and vegetation management effects on grassland carbon cycling. *Environmental Research Letters* 11, 074016.
- Armstrong, A., Waldron, S., Whitaker, J., Ostle, N.J., 2014. Wind farm and solar park effects on plant–soil carbon cycling: uncertain impacts of changes in ground-level microclimate. *Global Change Biology* 20, 1699-1706.
- Lambert, Q., Bischoff, A., Cueff, S., Cluchier, A., Gros, R., 2021. Effects of solar park construction and solar panels on soil quality, microclimate, CO effluxes, and vegetation under a Mediterranean climate. *Land Degradation & Development* 32, 5190-5202.
- Marrou, H., Dufour, L., Wery, J., 2013. How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil–crop system? *European Journal of Agronomy* 50, 38-51.
- Marrou, H., Guillioni, L., Dufour, L., Dupraz, C., Wery, J., 2013. Microclimate under agrivoltaic systems: Is crop growth rate affected in the partial shade of solar panels? *Agricultural and Forest Meteorology* 177, 117-132.
- Moscatelli, M.C., Marabottini, R., Massaccesi, L., Marinari, S., 2022. Soil properties changes after seven years of ground mounted photovoltaic panels in Central Italy coastal area. *Geoderma Regional* 29, e00500.
- Oberholzer, H.-R., Scheid, S., 2007. Bodenmikrobiologische Kennwerte. Erfassung des Zustands landwirtschaftlicher Böden im NABO-Referenzmessnetz anhand biologischer Parameter (NABObio). Bundesamt für Umwelt BAFU, Bern.
- Weselek, A., Bauerle, A., Hartung, J., Zikeli, S., Lewandowski, I., Högy, P., 2021. Agrivoltaic system impacts on microclimate and yield of different crops within an organic crop rotation in a temperate climate. *Agronomy for Sustainable Development* 41, 59.
- Weselek, A., Ehmann, A., Zikeli, S., Lewandowski, I., Schindele, S., Högy, P., 2019. Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 39, 35.

Naturnahe Gestaltung von Agri-PV-Anlagen: Zusätzliche Maßnahmen zum Schutz von Feldhamster und Vogelwelt (SolarInput e.V.)

Agri-PV-Systeme können indirekt zum Schutz von Lebensräumen und Arten beitragen, indem sie den Druck auf wertvolle Naturräume verringern. Zudem kann ihr Beitrag zum Klimaschutz indirekt positive Effekte für die Artenvielfalt haben (NABU, 2023). Durch die Kombination von Landwirtschaft und Energieerzeugung entstehen positive Synergieeffekte für Ökosystemdienstleistungen (Ludzuweit et al. 2025). So spielt beispielsweise die Lichtdurchlässigkeit der Solarmodule eine entscheidende Rolle für die Artenvielfalt unter den Anlagen. Durch eine optimale Modulhöhe und -anordnung kann ein Mosaik aus Licht und Schatten geschaffen werden, das unterschiedlichen Pflanzenarten und Insekten vielfältige Lebensbedingungen bietet. (Vollmer, 2022). Dies ist ein enormer Vorteil von APV gegenüber herkömmlicher FFPV.

Dies fördert die Artenvielfalt, insbesondere für Insekten, jedoch nur begrenzt. Solange unter Agri-Photovoltaikanlagen weiterhin Pestizide eingesetzt werden, bleibt eine signifikante Erhöhung der Artenvielfalt selbst auf Blühstreifen schwer umsetzbar. Studien zeigen, dass die Kontaminationsrate durch Pflanzenschutzmittel (PSM) beim Getreideanbau bereits ab einer Entfernung von mehr als 2 m vom Feldrand um etwa 75 % reduziert wird (Fluhr-Meyer & Adelman, 2020). Studien des APV-Projekts Kressbronn zeigen, dass der erforderliche Einsatz von Pflanzenschutzmitteln (PSM) unter Agri-Photovoltaikanlagen um 70 % reduziert werden konnte. Dies verdeutlicht, dass sowohl die Menge als auch die Häufigkeit des PSM-Einsatzes unter APV erheblich verringert werden können. Wenn dieser Rückgang von PSM mit einem gezielten und schonenden Einsatz kombiniert wird, könnten erhebliche Potenziale zur Förderung der Artenvielfalt unter APV-Anlagen erschlossen werden.

Zusätzlich sollten beim Bau der Anlage und der Bewirtschaftung von Agri-PV-Flächen, bodenschonende Verfahren im Vordergrund stehen. Dazu gehören die Vermeidung von Bodenverdichtung durch schwere Maschinen (BMWK 2024).

Die Anlage von Blühstreifen, Ankerpflanzen, mehrjährigen Strukturen und Brachen innerhalb der Agri-PV-Flächen ist ebenfalls eine effektive Maßnahmen zur Förderung der Biodiversität. Durch die Aussaat heimischen Saatguts entsteht ein reichhaltiges Nahrungsangebot für Insekten und andere Tiere. Diese Blühstreifen können zudem als Nistplätze für im Offenland brütende Vögel dienen und zur Verbesserung des Mikroklimas beitragen. Der Einsatz heimischen Saatguts ist von großer Bedeutung, da sie an die lokalen Bedingungen angepasst sind und somit eine wichtige Nahrungsgrundlage für heimische Tiere, wie bspw. den Feldhamster, darstellen. Auch das Insektenvorkommen lässt sich durch das artenreiche Saatgut deutlich steigern. Zusätzlich zur Schaffung von Blühstreifen wäre die Anbringung von Nisthilfen für Vögel und Fledermäuse eine sinnvolle Maßnahme zur Förderung der Biodiversität. Um das Angebot an Lebensräumen für Insekten weiter zu erhöhen, können verschiedene Strukturen geschaffen werden. Dazu zählen Totholzhaufen, Steinriegel oder

spezielle Insektenhotels. (Bundesprogramm leben.natur.vielfalt, 2022). Durch diese Maßnahmen kann der Eingriff in den Naturhaushalt, den es im Genehmigungsprozess auszugleichen gilt, kompensiert werden.

Zusätzlich zu den Maßnahmen auf der Fläche sollten Wanderkorridore für Großsäuger bei der Planung der Anlage mitgedacht werden, deren Breite und Bepflanzung an die örtlichen Gegebenheiten angepasst sind. Außerdem sollte die Durchgängigkeit für kleinere Tierarten gewährleistet sein, um die Zerschneidung von Lebensräumen zu vermeiden (BMWK 2024 – NaSchu Mindestkriterien).

Feldhamsterschutz

Die besonders geschützten Feldhamster kommen in Thüringen und speziell in der Region um Erfurt herum vor und müssen zusätzlich bei der Planung von Agri-PV Anlagen berücksichtigt werden. Feldhamster ernähren sich hauptsächlich von Pflanzen, Samen und Insekten. Eine vielfältige Fruchtfolge mit verschiedenen Kulturen stellt sicher, dass das ganze Jahr über ausreichend Nahrung zur Verfügung steht. Zusätzlich benötigen sie dichte Vegetation, um sich vor Feinden zu schützen und ihre Baue anzulegen. Intensive Bodenbearbeitung und der Einsatz von Pestiziden stören den Lebensraum des Feldhamsters und können zu einem Rückgang der Population führen (Stiftung Naturschutz Thüringen, 2023).

Bevor eine Agri-PV-Anlage errichtet wird, sollte eine Feldhamsterfeinkartierung nach Weidling und Stubbe oder eine Feldhamsterkartierung mit Hilfe von ausgebildeten Artenspürhunden durchgeführt werden, um das Vorkommen von Feldhamstern zu ermitteln. Wird bei der Planung einer Agri-PV-Anlage das Vorkommen von Feldhamstern festgestellt, ist eine Anpassung der Bewirtschaftung der Flächen unter den Solarmodulen unerlässlich. Um die positiven Potenziale der Agri-PV für den Feldhamsterschutz optimal zu nutzen, sollte die Bewirtschaftung an die höherwertigen Maßnahmen (F2 und F3) des Feldhamster-KULAP des Freistaates Thüringen angelehnt werden. Eine kleinteilige Bewirtschaftung und die Anlage spezieller Feldhamster-Blühstreifen können den Lebensraum dieser gefährdeten Art erheblich verbessern. Konkrete Maßnahmen können beispielsweise eine spätere Mahd, die Schaffung von Brachen und die Förderung von bestimmten Pflanzenarten umfassen. Über eine vertragliche Regelung der Maßnahmen sollte im Rahmen der weiteren Planung nachgedacht werden. Eine schonende Bodenbearbeitung, der Verzicht auf Pestizide und die Schaffung von Brachen fördern den Feldhamsterschutz außerdem. Eine vielfältige Landschaft mit Hecken, Feldgehölzen und Steinriegeln bietet dem Feldhamster zusätzliche Lebensräume (Bundesprogramm leben.natur.vielfalt, 2022; Stiftung Naturschutz Thüringen, 2023).

Feldhamster profitieren am meisten von einer vielfältigen Fruchtfolge. Wintergetreide bietet ihnen Deckung und Nahrung, während Leguminosen wie Klee und Luzerne ihren Speiseplan durch hochwertiges Eiweiß ergänzen. Brachen und Blühstreifen sind ebenfalls essenziell für Nahrung und Schutz. Eine ausgewogene Kombination aus verschiedenen Kulturen, darunter auch Zuckerrüben und Sonnenblumen in einem streifenförmigen Anbau, kann den

Lebensraum des Feldhamsters deutlich aufwerten. Mais und Raps (oft in Monokultur) hingegen bieten dem Feldhamster kaum Deckung und Nahrung oder erfordert oft eine intensive Bodenbearbeitung und den Einsatz von Pestiziden, was den Lebensraum des Feldhamsters beeinträchtigt (Stiftung Naturschutz Thüringen Link, s. oben).

Die Teilung der landwirtschaftlichen Flächen schafft des Weiteren wertvolle Lebensräume für den Feldhamster. Kleinere Flächen bieten mehr Deckung und Nahrung, insbesondere in der kritischen Zeit nach der Ernte, was besonders wichtig für diese Art ist. Diese Maßnahme ergänzt die bestehenden Schutzmaßnahmen und trägt zur Erhaltung der Feldhamsterpopulation bei (Stiftung Naturschutz Thüringen, 2023).

Nach der Umsetzung der Schutzmaßnahmen sollte in den ersten zwei Jahren nach Anlagenbau, anschließend in einem Turnus von zwei (oder drei) Jahren der Zustand der Feldhamsterpopulation überprüft werden. Die Notwendigkeit von Anpassungen sollte an klare Kriterien geknüpft sein. So könnte beispielsweise eine Verkleinerung der Population um 20 % im Vergleich zur vorherigen Erhebung als Indikator dienen. Um flexibel auf sich verändernde Bedingungen reagieren zu können, sollten mögliche Anpassungsmaßnahmen bereits im Vorfeld festgelegt werden. Hierzu zählen beispielsweise das Anlegen zusätzlicher Blühstreifen, das Aufstellen von Tränken, Zäunen oder Futterstellen.

Vogelschutz

Die Integration von Biodiversitätsmaßnahmen, insbesondere der Schutz regional heimischer Vogelarten, ist ein zentraler Aspekt bei der Planung von APV-Anlagen. Viele Vogelarten sind auf ein vielfältiges Nahrungsangebot angewiesen, das Samen, Insekten und, im Falle von Greifvögeln, kleine Säugetiere umfasst. Eine diverse Fruchtfolge mit unterschiedlichen Kulturen trägt entscheidend dazu bei, ganzjährig eine ausreichende Nahrungsgrundlage zu gewährleisten. Darüber hinaus benötigen Vögel strukturreiche Lebensräume, die durch dichte Vegetationsstreifen charakterisiert sind. Diese erfüllen eine Doppelfunktion: Sie bieten sowohl Nist- und Rückzugsorte als auch Schutz vor Prädatoren (Harrison & Lloyd, 2016).

Intensive landwirtschaftliche Praktiken, einschließlich des Einsatzes von Pestiziden, können die Verfügbarkeit solcher Lebensräume erheblich beeinträchtigen und tragen häufig zu einem Rückgang der Vogelpopulationen bei. Aus diesem Grund ist eine enge Zusammenarbeit mit Naturschutzbehörden von zentraler Bedeutung, um Biodiversitätsmaßnahmen gezielt umzusetzen.

Um negative Auswirkungen auf die Vogelwelt zu minimieren, ist per Bundesnaturschutzgesetz die Baufeldfreimachung, d.h. die Präparierung der Projektfläche für den Start der Bauphase, an den Zeitraum außerhalb der gesetzlichen Brutzeit (01.10. bis 28.02.) geknüpft. Diese zeitliche Steuerung schützt bestehende Brutstätten und fördert den Fortpflanzungserfolg der betroffenen Arten. In Ausnahmefällen kann in Abstimmung mit der Unteren Naturschutzbehörde eine Baufeldfreimachung auch in der Brutzeit erfolgen, vorausgesetzt es brüten zu diesem Zeitpunkt keine Vögel auf der Baufläche. Es empfiehlt sich,

Vergrämnungsmaßnahmen durch wiederholtes “schwarzziehen” der Ackerflächen vorzunehmen, um eine Ansiedlung von Brutpaaren zu verhindern.

Die Gestaltung von Agri-PV-Anlagen bietet weitreichende Möglichkeiten, die Vogelwelt zu fördern. Beispielsweise können Blühstreifen angelegt werden, die nicht nur Vögeln, sondern auch Insekten und anderen Wildtieren als Nahrungsquelle dienen. Darüber hinaus tragen gebietsheimische Wildgehölze wie Schneeball (*Viburnum opulus*), Kornelkirsche (*Cornus mas*) oder Faulbaum (*Frangula alnus*), die entlang der Zäune der Anlagen gepflanzt werden, zur ökologischen Wertsteigerung bei. Solche Gehölze bieten Nahrung, Unterschlupf und Fortpflanzungsmöglichkeiten für zahlreiche Vogelarten.

Zusätzlich können gezielt geschaffene Nistmöglichkeiten wie Nistkästen oder Reisighaufen Lebensräume für Vögel und andere Tierarten schaffen. Reisighaufen, die durch das Aufschichten dünner Äste und Zweige gebildet werden, sind besonders förderlich. Sie sollten idealerweise eine Grundfläche von mehr als 2 m² haben und aus heimischen Gehölzarten bestehen, beispielsweise aus dem Heckenschnitt des angrenzenden Wildgehölzes. Ihre Platzierung im Bereich der Hecken erhöht deren Funktionalität als strukturreicher Lebensraum.

Die Umsetzung der beschriebenen Maßnahmen trägt nicht nur zum Schutz der Vogelwelt bei, sondern stärkt auch die Biodiversität und damit die Resilienz der Agrarlandschaft insgesamt. (Bundesprogramm leben.natur.vielfalt, 2022).

Der Landschaftspflegeverband (LPV) Mittelthüringen sieht in der Umsetzung des Agri-PVThue-Konzepts eine vielversprechende Möglichkeit (s. Stellungnahme des LPV Mittelthüringen zum Konzept Agri-PVThue), sofern die notwendigen Naturschutzmaßnahmen gewährleistet sind.

Literaturverzeichnis

Die verwendete Literatur dieses Gutachtens findet sich im Haupt-Literaturverzeichnis des Agri-PVThue Konzeptes



LPV Mittelthüringen e.V.
Am Stausee 36E
99439 Am Ettersberg
Tel.: 036452 / 18 77 20
Fax.: 036452 / 18 77 29
kontakt@lpv-mittelthueringen.de
www.lpv-mittelthueringen.de

Landschaftspflegeverband Mittelthüringen e.V.

Stellungnahme zum Konzept „Agri-PVThue“

25.10.2024

Vorsitzender:
Dietmar Schwerz

Auf Grund der immer beliebter werdenden Agri-PV-Anlagen kommt es immer häufiger vor, dass Agri-PV-Anlagen im Vorkommensgebiet des Feldhamsters angelegt werden sollen. Daher ist es an der Zeit Agri-PV und Feldhamsterschutz gemeinsam zu denken.

Geschäftsführerin:
Jana Apel

Stellv. Geschäftsführerin:
Annemarie Bauer

Aus Sicht des Landschaftspflegeverbandes Mittelthüringen e.V. wird im Konzept des Projektes „Agri-PVThue“ gewissenhaft auf die Thematik „Feldhamsterschutz“ eingegangen. Es ist positiv zu betrachten, dass im Konzept eine Feldhamstererfassung nach geeigneter Methode im Vorfeld der Errichtung einer Agri-PV-Anlage festgehalten wird. Bei Feststellen von Feldhamstervorkommen auf geplanten Agri-PV-Flächen, werden geeignete Maßnahmen vorgeschlagen, welche an die hochwertigen Feldhamster-KULAP-Maßnahmen angelehnt sind.

Ebenfalls wird darauf eingegangen, dass die Größe der Feldhamsterpopulation auch nach Anlage der Maßnahme regelmäßig überprüft wird und bei einem Populationsrückgang Maßnahmen ergriffen werden müssen, die die Population zusätzlich stärken.

Auch die im Konzept beschriebenen bodenschonenden Fundamentsysteme sind nach Meinung des LPV Mittelthüringen geeignet, um auf von Feldhamstern besiedelten Flächen eingesetzt zu werden und den Lebensraum so wenig wie möglich zu beeinträchtigen.

Aus Sicht des LPV Mittelthüringen ist das Konzept des Projektes „Agri-PVThue“ geeignet, um Feldhamsterschutz und Agri-PV-Anlagen gemeinsam auf einer Fläche umzusetzen. Durch die langfristige Erfassung der Populationsgröße können außerdem erstmalig in Thüringen Daten erhoben werden, die eine Beurteilung ermöglichen, ob Feldhamsterpopulationen bei angepasster Bewirtschaftung unter Agri-PV-Anlagen ansässig bleiben.

Daher ist das Konzept des Projektes „Agri-PVThue“ aus Sicht des Landschaftspflegeverbandes Mittelthüringen e.V. bezüglich des Feldhamsterschutzes zu befürworten, sofern die Erfassung der Feldhamsterpopulation im Vorfeld und im Verlauf des Anlagenbetriebs sowie die feldhamsterfreundlichen Bewirtschaftungsmaßnahmen wie beschrieben umgesetzt werden.


Jana Apel

- Geschäftsführerin -

Landschaftspflegeverband
„Mittelthüringen“ e.V.

Am Stausee 36 E,
99439 Am Ettersberg

Tel.(Fax): 036 452 / 187720 (-29)

Am Ettersberg, den 25.10.2024



NATURA 2000-STATION
Mittelthüringen/Hohe Schrecke

Landschaftspflegeverband Mittelthüringen e.V.
IBAN: DE09820641880001019929
BIC: GENODEF1WE1, VR Bank Weimar

Leistungsportfolio Messkonzept der Materialforschungs- und Prüfanstalt Weimar im Rahmen des Agri-PV-Projektes im Maximalkonzept

Ansprechpartnerin: Dr. Sabine Schmidt, +49 3643 564-175, sabine.schmidt@mfpa.de

1. Planung des Messkonzeptes

- a. Fokus auf Bodenuntersuchungen (Bestimmung des Bodenprofils und Charakterisierung): Durchführung von Bodenproben, Bodenanalysen zum Bodenprofil, Bodenschichten, Bodeneigenschaften (z.B. Porengrößenverteilung); Kennwerte zur Ermittlung von Wasser- und Lufthaushalt des Bodens; Bodenmonitoring sowie Analyse der Bodenstruktur vor dem Bau und während der Nutzung der Agri-PV-Anlage hinsichtlich Veränderungen
- b. Fokus auf hyperspektrale Erfassung vom Wassergehalt der Pflanzen
- c. Temperatur- und Feuchtigkeitsmessungen

Aufnahme von Messreihen für Boden, Licht, Wasser, Temperatur

2. Umsetzung des Messkonzeptes sowie Einrichtung und Betrieb des Monitoringsystems

- a. Sensoren in Bezug auf die Fruchtfolge unter Agri-PV-Anlage und den Referenzflächen
- b. Kameras: Hyperspektrale Bildanalyse direkt an den Pflanzen hinsichtlich Chlorophyll- und Zuckergehalt und Auswertungen zum Wassergehalt in der Pflanze (vorzugsweise im SWIR-Bereich bei 1.450 nm und 1.950 nm)
- c. Datenerfassung in enger Absprache mit Agrarwissenschaftlern und TLLLR (Management Datenvolumen!)

3. Betreuung zum Monitoring

- a. Anlernen von KI mit optischen und geotechnischen Kennwerten