



GIS-Based Economic Optimization of Agro-Photovoltaics in Germany Accounting for Technical and Regulatory Boundary Conditions

Abdulkhkim Mohamed¹ und Reinhard Madlener^{2,3,4,5}

¹ RWTH Aachen University

² Lehrstuhl für Energieökonomik am Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior (FCN),
School of Business and Economics / E.ON ERC, RWTH Aachen University

³ Department of Industrial Economics and Technology Management, NTNU (Trondheim, Norwegen)

⁴ RWTH Profilbereich ECPE und JARA-ENERGY (Strategiegruppen)

⁵ Vize-Präsident SAEE



10. Energieforschungsgespräche Disentis 2025
Disentis (Graubünden, CH), 29.-31. Januar 2025



Überblick

1. Einführung in die Agro-PV

- Historischer Abriss
- Definition und Marktentwicklung
- Kategorisierung und Anwendungsbereiche
- Potenziale in Deutschland

2. Rechtliche Rahmenbedingungen für Agro-PV (DE, IT, FR)

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse I (Investorensicht)

4. Wirtschaftlichkeitsanalyse II (GIS-basierte Analyse für DE)

5. Zusammenfassung und Ausblick

1. Einführung in die Agro-PV – Geschichte der Agro-PV

- 1981/1982:
 - ≡ Wissenschaftliche Untersuchung von **Prof. Dr. Adolf Goetzberger & Dr. Armin Zastrow**: „Kartoffeln unter dem Kollektor“
 - ≡ Einführung des Konzepts der Agro-PV zur gleichzeitigen Nutzung von Ackerflächen für Solarenergie und Landwirtschaft
 - ≡ Veröffentlichung des Papers „On the Coexistence of Solar-Energy Conversion and Plant Cultivation“ durch die beiden Autoren (*Int J. Sol. Energy*, 1982)
- 2004:
 - ≡ Entwicklung des Prototyps „**Solar Sharing**“ durch Nagashima in **Japan**
 - ≡ Bau der ersten Anlage in **Deutschland**
- 2011: Erste größere Anlagen in **Frankreich** und **Italien**
- 2013:
 - ≡ Start des weltweit ersten staatlichen Förderprogramms in Japan
 - ≡ Weltweit Beginn der Implementierung und des Ausbaus staatlicher Förderprogramme
- 2020: Internationale Konferenzreihe zu **AgroVoltaics** ins Leben gerufen
www.agrivoltaics-conference.org

1. Einführung in die Agro-PV – Definition und Marktentwicklung

■ Definition Agro-PV

- ≡ „Agro-Photovoltaik“ (auch „Agri-PV“ oder „Agro-Voltaik“) ist das Konzept der gleichzeitigen Nutzung von Ackerflächen für Solarenergiegewinnung und Landwirtschaft

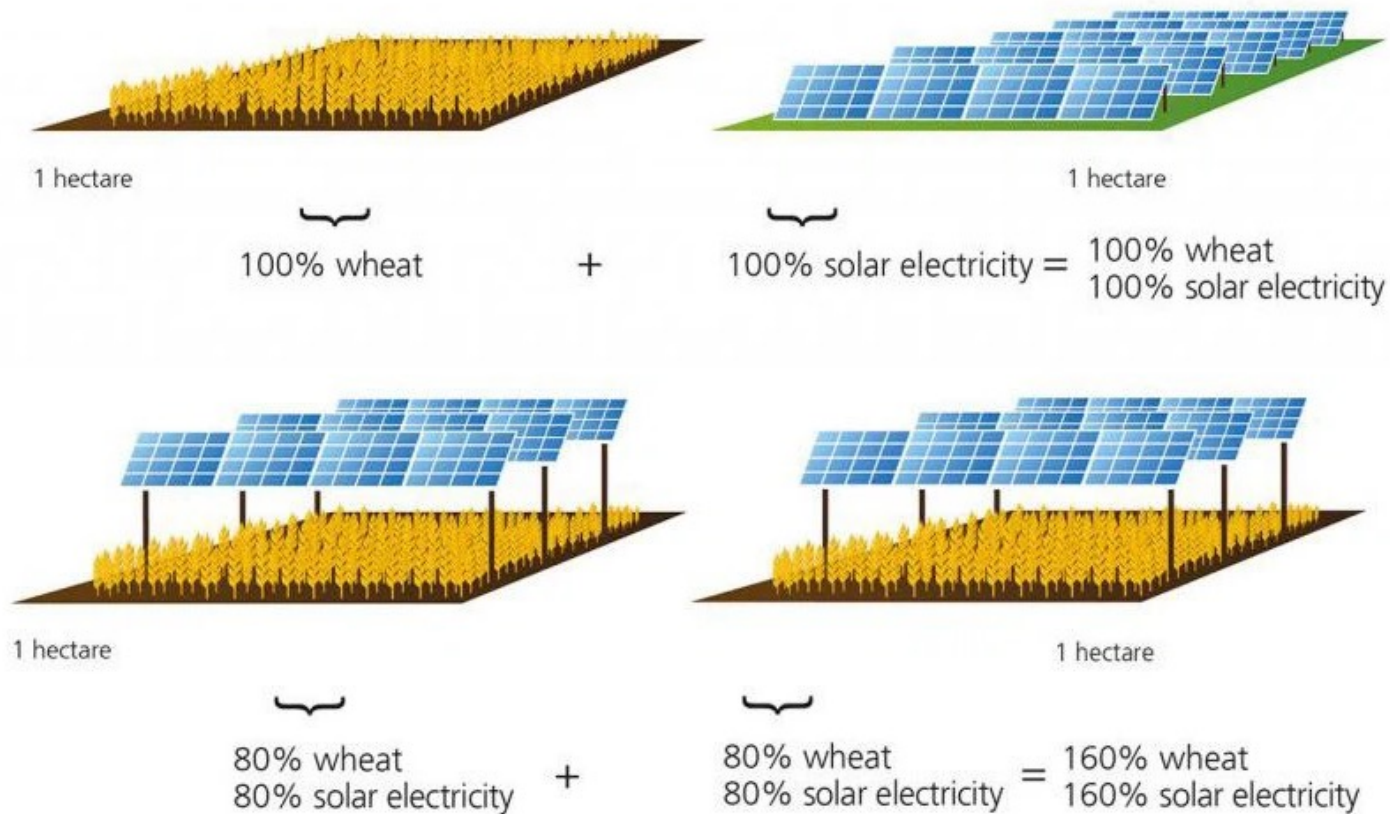
■ Relevanz und globale Marktentwicklung

- = Installierte Leistung: Bis 2021 weltweit 14 GW_p (davon China ~12 GW_p)
- = 2023: Genehmigung des grössten europäischen Förderprogramms mit 1,7 Mrd. €
- = Marktgrösse: 5,45 Mrd. US\$ (2024)
- = Wachstumsrate: Prognostizierte jährliche Steigerung um 5,9 % (2024–2032)



Quelle: <https://www.verifiedmarketresearch.com/product/agrivoltaics-market/>

1. Einführung in die Agro-PV



Kuppelproduktion, Vermeidung / Reduzierung der Flächenkonkurrenz („flächenschonend“)

1. Einführung in die Agro-PV

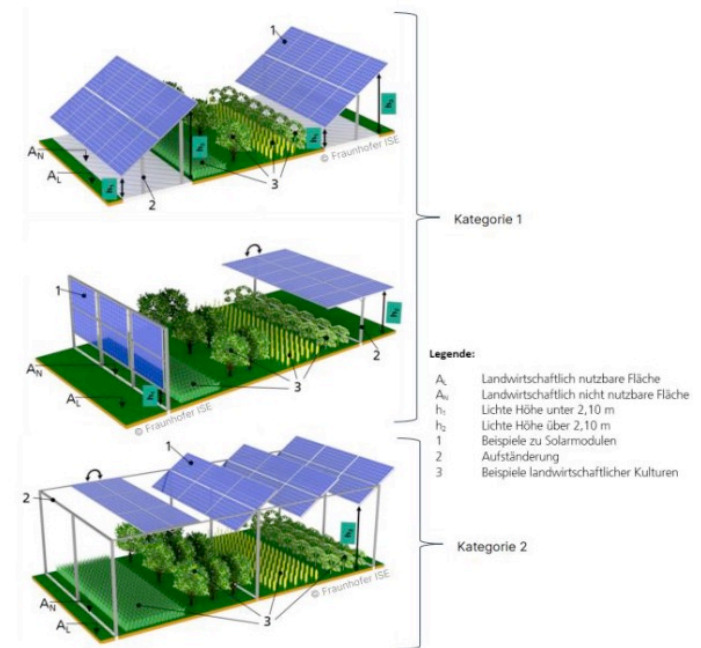
- Agro-PV Systeme gehören zu den offenen Solar-Systemen; zwei Kategorien können unterschieden werden:

- ≡ **Kat. 1: Bodennahe horizontale oder vertikale Systeme**

- = Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen zwischen den Modulreihen
- = Geringe Höhe von $< 2,1$ m

- ≡ **Kat. 2: Hoch aufgeständerte horizontale Systeme**

- = Bewirtschaftung der Flächen unterhalb der Module
- = Höhen von mind. $2,1$ m bis zu 7 m



- **Anwendungsbereiche:**

- ≡ **Dauerkulturen:** Obst- und Weinbau $<$ Hochaufgeständerte Systeme $< 2,1$ m
- ≡ **1- und mehrjährige Kulturen:** Gemüse, Ackerkulturen \rightarrow hoch aufgeständerte Systeme $> 2,1$ m
- ≡ **Dauergrünland mit Schnittnutzung** \rightarrow Vertikale Systeme

1. Einführung in die Agro-PV – Potenziale in Deutschland (1/2)

■ Aktuelle Nutzung von Solaranlagen in DE (2022):

- ≡ Fläche: 34'700 ha, davon 40 % im landwirtschaftlich Bereich (12'200 ha)
- ≡ Installierte Leistung: 20 GW_p (0,1 % der Landesfläche, flächenintensiver als andere Energieformen)

■ Vergleich zur landwirtschaftlichen Nutzung:

- ≡ **Energiepflanzen** (Mais etc.): 14 % der landwirtschaftlichen Fläche (der Nahrungsmittelprod. entzogen)
- ≡ **Agro-PV**: Gleichzeitige Nutzung für Landwirtschaft und Solarenergie

■ Potenzial:

- ≡ Agro-PV bietet durch Doppelnutzung landwirtschaftlicher Flächen ein enormes (Ausbau-) Potenzial →
- ≡ Zahlreiche Vorteile
 - = Schutz der Pflanzen vor zu viel Sonne, Hagel, Dürre; , Regenwassergewinnung über die Module
 - = Kontinuierliche Einnahmenquelle (weniger „Pachtpreiskampf“ mit PV-Betreibern, Resilienz d. Bauern)
 - = Ersatz von Hagelnetzen und Folientunneln
 - = Reduzierte Flächenkonkurrenz, weniger Flächenversiegelung, ...

1. Einführung in Agro-PV – Potenziale in Deutschland (2/2)

- **Theoretisches Potenzial:** Maximal erreichbare Nutzung der Technologie
 - ≡ Landwirtschaftliche Fläche: 167'000 km² (16,7 Mio. ha)
 - ≡ Installierte Leistung: 10'000 GW (hochaufgeständert), 4'100 GW (vertikal)

- **Technisches Potenzial:** Berücksichtigung grundlegender technischer Einschränkungen
 - ≡ Hochaufgeständerte Systeme: 1'700 GW (schattentolerante Kulturen & typische Fruchtfolgen)
 - ≡ Vertikale Systeme: 1'200 GW (Dauergrünland mit bodennahen Modulen)

- **Wirtschaftliches Potenzial:** ? (stark regulierungsabhängig, noch viel Forschungsbedarf)

- **Energieeinsparung:**
 - ≡ Bilanziell würden nur 4 % der Agrarflächen den Strombedarf Deutschlands mehr als abdecken

2. Rechtliche Rahmenbedingungen für Agro-PV – Deutschland (1/3)

- Agro-PV-Anlagen gelten gemäss **Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG)** als Anlagen für erneuerbare Energien
- **Netzanschluss:** Vorrangiger Netzanschluss (§ 8 EEG 2023)
- **Kostenteilung:**
 - ≡ Anschlusskosten: Betreiber
 - ≡ Netzausbaukosten: Netzbetreiber
- **Stromabnahme** (§ 11 EEG 2023):
 - ≡ Vorrangige Abnahme des Stroms durch Netzbetreiber
 - ≡ Entschädigung bei nicht eingespeistem Strom (Abregelung)



Source: EU Roadmap 2050 brochure (2012)

2. Rechtliche Rahmenbedingungen für Agro-PV – Deutschland (2/3)

■ Direktvermarktung & Einspeisevergütung:

- ≡ Anlagen > 100 kW_p: Verpflichtung zur Direktvermarktung (Marktprämie)
- ≡ Anlagen < 100 kW_p: Wahlmöglichkeit zwischen Direktvermarktung und Einspeisevergütung



■ Ausschreibungspflicht:

- ≡ Anlagen > 1'000 kW_p: Teilnahme an Ausschreibungen erforderlich
- ≡ Bürgerenergiegesellschaften: Sonderregelung (Grenze bei 6'000 kW_p)

■ Technologie-Bonus:

- ≡ Für hochaufgeständerte Anlagen (> 2,1 m Höhe)
- ≡ Bis 2028: Reduzierung von 1,2 €-ct/kWh auf 0,5 €-ct/kWh

■ Laufzeit der Förderung: 20 Jahre ab Inbetriebnahme

Source: EU Roadmap 2050 brochure (2012)

2. Rechtliche Rahmenbedingungen für Agro-PV – Deutschland (3/3)

■ **DIN SPEC 91434 (2024)**

- ≡ Erste Norm für Agro-PV in Deutschland, Fokus auf duale Flächennutzung



■ **Ziel:** Balance zwischen landwirtschaftlicher Produktivität und Solarenergie

■ **Anforderungen an Planung und Betrieb:**

- ≡ Nutzungskonzept: Zusammenarbeit zwischen Landwirten und Anlagenbetreibern, mind. 66 % Referenzertrag
- ≡ Flächennutzung: Max. 10 % (hochmontiert), 15 % (bodennah), garantierter Rückbau
- ≡ Umweltauflagen: Lichtverfügbarkeit, Bodenschutz, Regenverteilung

Source: EU Roadmap 2050 brochure (2012)

2. Rechtliche Rahmenbedingungen für Agro-PV – Italien

- Keine offizielle Norm, aber detaillierter Leitfaden des Ministeriums für Umwelt und Energiesicherheit (MITE 2022).
- **Vier Hauptanforderungen (kategorisiert in A-E):**
 - ≡ Flächennutzung: mind. 70 % weiter für Landwirtschaft, max. 40 % durch PV-Module bedeckt
 - ≡ Synergie: Landwirtschaftliche Tätigkeit muss erhalten bleiben, Stromproduktion ≥ 60 % eines Standard-PV-Systems
 - ≡ Technologische Lösungen: vertikale, geneigte oder hoch aufgeständerte Module
 - ≡ Monitoring: Überwachung von Wassereinsparung, Bodenfruchtbarkeit und Klimawandel-Resilienz
- **Fördermöglichkeiten:**
 - ≡ PNRR-Fördermittel: € 1,1 Mrd. für Agro-PV
 - ≡ Fortschrittliche Anlagen (Anforderungen A–E, s.o.) erhalten staatliche Unterstützung



Source: EU Roadmap 2050 brochure (2012)

2. Rechtliche Rahmenbedingungen für Agro-PV – Frankreich

- **Definition:** Stromerzeugung und nachhaltige Förderung der landwirtschaftlichen Produktion
- **Erforderliche Dienstleistungen:**
 - ≡ Agronomisches Potenzial verbessern
 - ≡ Anpassung an den Klimawandel
 - ≡ Schutz vor Risiken, Tierwohl fördern
- **Einschränkungen:**
 - ≡ Landwirtschaft als Haupttätigkeit muss erhalten bleiben
 - ≡ Rückkehr zur rein landwirtschaftlichen Nutzung nach Lebensdauer der Anlage muss möglich sein
- **Genehmigungsverfahren:**
 - ≡ Zusätzliche Genehmigung durch eine Kommission (CDPENAF) erforderlich (ökologische u. landwirtschaftliche Prüfung)
 - ≡ Keine verbindlichen Mindestkriterien wie in anderen Ländern
 - ≡ Flexibler Ansatz: Anpassung an regionale Anforderungen und Zielsetzungen



Source: EU Roadmap 2050 brochure (2012)

2. Rechtliche Rahmenbedingungen für Agro-PV – Vergleich

- **Normen:** Deutschland ist mit der DIN SPEC 91434 am fortschrittlichsten. Italien entwickelt derzeit eigene Normen, während Frankreich über Leitfäden und Labels agiert
- **Förderung:** Deutschland und Italien bieten klare finanzielle Anreize, Frankreich setzt auf Labels und flexible Bewertung
- **Genehmigung:** Deutschland hat einen strengen, standardisierten Ansatz; Frankreich erlaubt eine flexible, regionsspezifische Bewertung
- **Technologie:** Italien legt großen Wert auf innovative Systemtypen, während Deutschland und Frankreich mehr auf praktikable Lösungen fokussieren



→ Für eine umfassendere Analyse der rechtlichen Rahmenbedingungen s.a. „Overview of the Potential and Challenges for Agri-Photovoltaics in the European Union”, *JRC Science for Policy Report*, 2023

Source: EU Roadmap 2050 brochure (2012)

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse (Investoren- u. nationale Perspektive)

(hier vorgestellte Studie)

Mohamed A., Madlener R. (2025). GIS-Based Economic Optimization of Agro-Photovoltaics in Germany Accounting for Technical and Regulatory Boundary Conditions, FCN Working Paper No. xx/2025 (in prep.).



- Kapitalwert, interner Zinsfuß und Amortisationsdauer für vertikale und hochaufgeständerte Agri-PV-Anlagen
- Ermittlung der Landnutzungsrate (LNR) pro ha für Agro-PV (analog zu LNR in der Landwirtschaft)
- GIS-basierte Analyse für Gesamtdeutschland (Berücksichtigung von Skalenerträgen und wichtiger Anbaupflanzen – Kartoffel, Apfel, Weizen, Klee gras)

Verwandte Literatur:

Willcockx et al. (2022): Geospatial assessment of elevated agrivoltaics on arable land in Europe, *Energy Reports*, 88736-8751.

→ Teilweise sehr detailreiche Modellierung, LNR- und LCOE-Berechnungen, jedoch keine umfassendere Wirtschaftlichkeitsanalyse wie in der vorliegenden Studie

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse – Inputs



■ Investitionskosten (CAPEX)

- ≡ Grösster Anteil an den Gesamtkosten
- ≡ Höher als bei konventionellen PV-Freiflächenanlagen (PV-FFA)
- ≡ **Kostenkomponenten:**
 - = Projektierung
 - = Flächenvorbereitung und Installation
 - = Systemkomponenten: Module, Wechselrichter und Unterkonstruktion
 - = Elektrik und Netzanschluss
 - = Monitoring und Sonstiges
- ≡ Zwischen 663 €/kW_p (vertikal) und 1'050 €/kW_p (hoch aufgeständert > 2,1 m)
- ≡ Typischerweise Schraub- oder Rammfundamente (keine Betonfundamente)

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse – Inputs

■ Betriebskosten (OPEX)

≡ Jährlich zu betrachten über gesamte Nutzungszeit

≡ **Kostenkomponenten:**

= Versicherungen

= Wartungen, Reparaturen

= Kaufmännische Betriebsführung

= Reserve

= Sicherheitsüberwachung, Monitoring

= Verwaltung

= Flächenpflege

≡ Analog zu Freiflächenanlagen, liegen bei etwa 17,22 €/kW_p



3. Wirtschaftlichkeitsanalyse – Grundannahmen



- Einspeisung und Eigenverbrauch: Pauschal 15'000 kWh, davon 30 % Eigenverbrauch
- Landwirtschaftliche Erlöse (Erzeugerpreise):
 - ≡ Apfel: 1340 €/t
 - ≡ Kartoffel: 468 €/t
 - ≡ Weizen: 214 €/t
 - ≡ Grünland 20 €/t
- Anlagengröße: 10 ha → 3 MW_p (vertikal), 6 MW_p (hoch > 2,1 m) und 7 MW_p (hoch < 2,1 m)
- Stromkosten: 0,25 €/kWh
- Betrachtungszeitraum: 25 Jahre
- Inflationsrate: 2 %
- Preissteigerungsrate (für Erzeuger- und Strompreise): 1,5 % p.a.
- Variante Kreditfinanzierung:
 - ≡ Zinssatz: 3 % p.a., 80 % Darlehensanteil (Fremdkapital)
 - ≡ Laufzeit: 10 Jahre

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse – Ergebniskategorien



■ **Kapitalwert (NPV) [€]**

- ≡ Summe der Gegenwartswerte der jährlichen Zahlungsströme
- ≡ Projekt durchführbar falls positive, ansonsten nicht wirtschaftlich
- ≡ $NPV = -CAPEX + \sum_{t=0}^n \frac{(E-A)}{(1+i)^t}$

■ **Interner Zinsfuß (IRR) [%]**

- ≡ Definiert als der Kalkulationszinssatz, bei dem der NPV Null wird
- ≡ Nutzbar um Projekte unterschiedlicher Größe miteinander zu vergleichen
- ≡ $0 = -CAPEX + \sum_{t=0}^n \frac{(E-A)}{(1+IRR)^t}$

■ **Amortisationsdauer (Payback time) [a]:** Zeitpunkt an dem der Kapitalwert Null wird

■ **Stromgestehungskosten (LCOE) [€-ct/kWh]:** Das Verhältnis der Investitions- und Betriebskosten zur elektrischen Stromerzeugung

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse – Variantenberechnung und Resultate



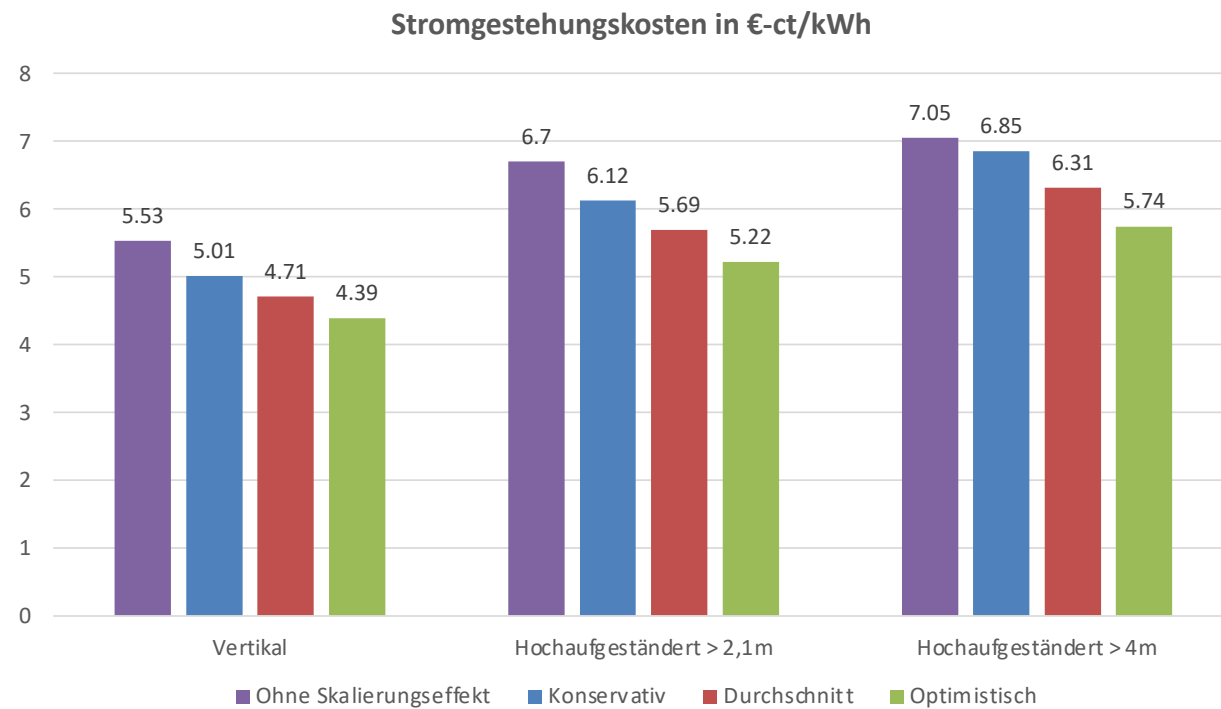
	Einheit	AGRO-PV-Vertikal Kartoffel	AGRO-PV-Hoch > 2,1 m Apfel	AGRO-PV-Hoch > 4 m Kartoffel	AGRO-PV-Hoch > 4 m Weizen
Anlagengröße	kW _p	3'000	7'000	6'000	6'000
CAPEX (spezifisch)	€/kW _p	663	894	1'050	1'050
Investitionskosten	Mio. €	1,989	6,258	6,300	6,300
Anteil Erlöse LW an Gesamteinnahmen	%	61,5	49,8	35,9	4,1
NPV (25 Jahre)	Mio. €	4,464	7,857	2,617	- 1,196
IRR	%	17	10	4	- 2
Amortisationsdauer	j	6	9	15	> 25
LCOE	€-ct/kWh	5,53	6,70	7,05	7,05

3. Wirtschaftlichkeitsanalyse – Skaleneffekte

- **Skaleneffekte:** Noch keine genauen Werte verfügbar, aber für zukünftige Entwicklungen notwendig abzuschätzen



- ≡ Konservativ
- ≡ Optimistisch
- ≡ Durchschnittlich



4. GIS-Analyse – In- und Outputs



- Betrachtung des wirtschaftlichen Potenzials für Deutschland sowie der *Landnutzungsrate (LNR)*
- **GIS-Karte**, erstellt aus:
 - ≡ Karte der landwirtschaftlichen Nutzflächen auf Basis von Satellitendaten (Thünen-Institut)
 - ≡ Solarkataster (Global Solar Atlas)
 - ≡ Kosten (CAPEX, OPEX, ...) aus Wirtschaftlichkeitsanalyse I
 - ≡ Basisparameterwerte aus Wirtschaftlichkeitsanalyse I
- Resultate für **zwei Konzepte**: vertikale und hochaufgeständerte Systeme
- Darstellung anhand folgender Parameter pro Flächeneinheit (ha):
 - ≡ Kapitalwert (NPV)
 - ≡ Landnutzungsrate:
$$LNR = \frac{S_{Agro-PV}}{S_{PV-FFA}} + \frac{Y_{Agro-PV}}{Y_{mono}}$$

4. GIS-Analyse – Variantenberechnung



■ NPV ohne Betrachtung von Skaleneffekten:

- ≡ Ohne Skaleneffekte sind hochaufgeständerte Systeme derzeit nicht wirtschaftlich umsetzbar für Deutschland, lediglich im Süden
- ≡ Vertikale Systeme sind auch ohne Skaleneffekte wirtschaftlich



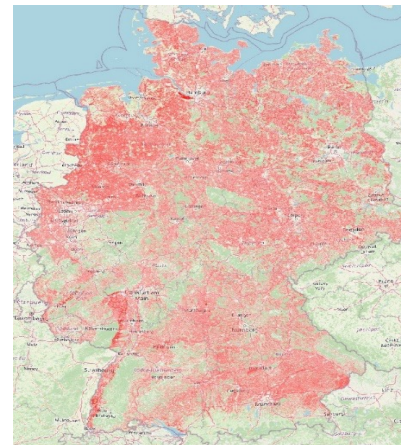
NPV: Hochaufgeständert



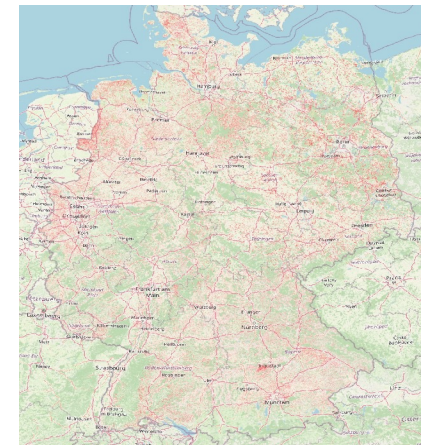
Vertikal

■ Landnutzungsrate (LNR):

- ≡ Für vertikale Systeme gleiche LNR, da gleicher geringer Ertragseinfluss auf Ernte und gleiche Moduldichte → $LNR = 1,25$
- ≡ LNR für hochaufgeständerte Systeme variabel mit Höchstwerten im Nord-Westen und Süd-Osten des Landes



LNR: Hochaufgeständert



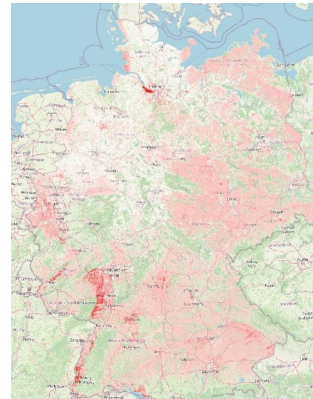
Vertikal

4. GIS-Analyse – Skaleneffekte

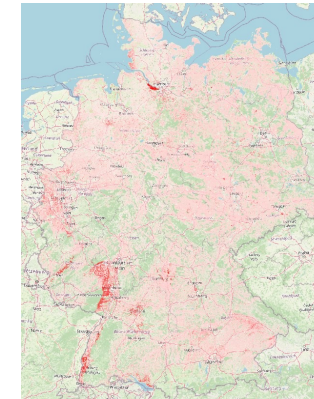


■ Hoch aufgeständerte Systeme:

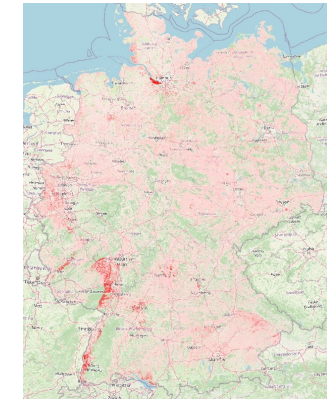
- ≡ Schon ein konservativer Effekt sorgt für eine erhöhte Umsetzbarkeit von Agro-PV
- ≡ Kein wesentlicher Unterschied zwischen durchschnittlichen und optimistischen Skaleneffekten



konservativ



durchschnittlich



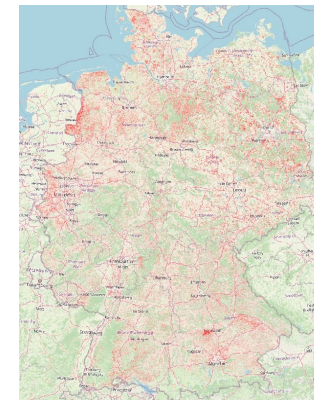
optimistisch

■ Vertikale Systeme:

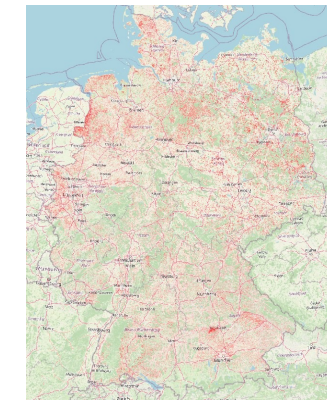
- ≡ Skaleneffekte haben keinen erkennbaren Einfluss auf die Umsetzbarkeit von Agro-PV
- ≡ Grund: Investitionskosten auch ohne Skaleneffekte wirtschaftlich



konservativ



durchschnittlich



optimistisch

5. Zusammenfassung und Ausblick

- Agro-PV bietet wirtschaftliche und ökologische Vorteile
- **Vertikale Agro-PV:**
 - ≡ Hohe Wirtschaftlichkeit (IRR bis zu 17 %)
 - ≡ Geringere Investitionskosten und Stromgestehungskosten (-22 % gegenüber hoch aufgeständerten Systemen)
- **Hochaufgeständerte Systeme:**
 - ≡ Grösseres Potenzial durch breitere Kompatibilität mit Nutzpflanzen
 - ≡ Aktuell begrenzt profitabel – benötigt Förderungen und Skaleneffekte
- **Schlüsselfaktoren für Erfolg:**
 - ≡ *Wahl der Anbaukultur:* Fokus auf Kulturen des mittleren bis hohen Preissegments
 - ≡ *Technologieentwicklung:* Innovative Materialien und Bauweisen reduzieren CAPEX
 - ≡ *Skaleneffekte:* Gemeinsame Infrastruktur und optimierte Prozesse für Kostensenkung.
 - ≡ *Finanzierungsmodelle:* Anpassung von Krediten und Förderprogrammen (niedrige Zinssätze, längere Fristen)

5. Zusammenfassung und Ausblick

■ Handlungsempfehlungen:

- ≡ *Förderung vertikaler Systeme*: Priorisierung dieser kosteneffizienten Technologie
- ≡ *Anreize für hoch aufgeständerte Systeme*: Zusätzliche Einspeisevergütungen oder Förderprogramme
- ≡ Europäische Standards: Einheitliche Regelungen für Flächennutzung, Förderung und Monitoring

■ Zukunftsperspektive / Ausblick:

- ≡ *Kurzfristige Priorität*: Vertikale Systeme für schnelle Erfolge
- ≡ *Langfristige Strategie*: Wirtschaftliche Skalierung hochaufgeständerter Systeme
- ≡ *Vision*: Agro-PV als Schlüssel zur Energiewende und nachhaltigen Landwirtschaft



Danke für die geschätzte Aufmerksamkeit.
Fragen?

Qu.: Hofgemeinschaft Heggelbach



Danke für die geschätzte Aufmerksamkeit.
Fragen?

Qu.: Getty Images



Danke für die geschätzte Aufmerksamkeit.
Fragen?

Kontakt:

Lehrstuhl für Energieökonomik (FCN-ECO)
Institute for Future Energy Consumer Needs and
Behavior (FCN)
E.ON Energy Research Center
Mathieustrasse 10, 52074 Aachen, Germany

Prof. Dr. Reinhard Madlener
T +49 241 80 49 820
RMadlener@eonerc.rwth-aachen.de
<http://www.fcn.eonerc.rwth-aachen.de>

Verwendete Literatur (Auswahl)

- Agostini, A.; Colauzzi, M.; Amaducci, S.: Innovative agrivoltaic systems to produce sustainable energy: An economic and environmental assessment. In *Applied Energy*, 2021, 281; S. 116102.
- Chatzipanagi, A.; Taylor, N.; Jaeger-Waldau, A.: Overview of the potential and challenges for agri-photovoltaics in the European Union. Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2023.
- DIN (2021). Deutsches Institut für Normung e. V.: Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung, 2021.
- Fraunhofer ISE (2023). *Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende – Ein Leitfadens für Deutschland*, Fraunhofer ISE, Freiburg/Br., 3. Aufl., November.
- Gerhards C., Schubert L., Lenz C., Wittmann F., Richter D. et al. (2022). Agri-PV - Kombination von Landwirtschaft und Photovoltaik.
- Ghosh, A.: Nexus between agriculture and photovoltaics (agrivoltaics, agriphotovoltaics) for sustainable development goal: A review. In *Solar Energy*, 2023, 266; S. 112146. Goetzberger A., Zastrow A. (1982). On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation, *Int. J. Sol. Energy* 1(1): 55-69.
- Lahr, S. (2022). Bottom-up GIS-Potenzialanalyse, Auswirkungen der Netzintegration sowie Bewertung der Nachhaltigkeit von vertikaler bifazialer Agri-Photovoltaik.
- **Mohamed A., Madlener R. (2025). GIS-Based Economic Optimization of Agro-Photovoltaics in Germany Accounting for Technical and Regulatory Boundary Conditions, FCN Working Paper No. xx/2025 (in prep.).**
- Schindele, S. (2021). Nachhaltige Landnutzung mit Agri-Photovoltaik: Photovoltaikausbau im Einklang mit der Lebensmittelproduktion: Szenarioanalyse zur Inanspruchnahme landwirtschaftlicher Nutzflächen durch Photovoltaik in Deutschland bis 2050. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society*, 30: 96–105.
- Trommsdorff M., Dhal I.S., Özdemir Ö.E. et al. (2022), Agrivoltaics: solar power generation and food production, in: *Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems*, Elsevier, 159-210.
- Willockx B., Lavaert C., Cappelle J. (2022). Geospatial assessment of elevated agrivoltaics on arable land in Europe to highlight the implications on design, land use and economic level, *Energy Reports*, 8: 8736-8751.

Back-Up: Wirtschaftlichkeitsanalyse – Skaleneffekte (konservativ)

Konservativer Skaleneffekt					
	Einheit	AGRO-PV-Vertikal Kartoffel	AGRO-PV-Hoch > 2,1 m Apfel	AGRO-PV-Hoch > 4 m Kartoffel	AGRO-PV-Hoch > 4 m Weizen
Anlagengröße	kW _p	3'000	7'000	6'000	6'000
CAPEX (spezifisch)	€/kW _p	562	779	922	922
Ertragseinfluss	%	-5	0	-18	-19
Erzeugerpreis	€/t	468	1'340	468	214
Landwirtschaftliche Erlöse 25 Jahre	Mio. €	4,786	8,525	4,131	0,318
Einspeisevergütung	€/kWh	0,0505	0,0625	0,0625	0,0625
Stromerlöse 25 Jahre	Mio. €	2,995	8,604	7,378	7,378
Gesamterlöse	Mio. €	7,781	17,128	11,509	7,696
Gesamtinvestitionskosten	Mio. €	1,686	5,453	5,532	5,532
Anteil Erlöse LW an Gesamteinnahmen	%	61,5	49,8	35,9	4,1
NPV 25 Jahre	Mio. €	4,767	8,662	3,385	- 0,428
IRR	%	21	13	6	0
Amortisationsdauer	j	4	7	13	> 25

Back-Up: Wirtschaftlichkeitsanalyse – Skaleneffekte (optimistisch)

Optimistischer Skaleneffekt					
	Einheit	AGRO-PV-Vertikal Kartoffel	AGRO-PV-Hoch > 2,1 m Apfel	AGRO-PV-Hoch > 4 m Kartoffel	AGRO-PV-Hoch > 4 m Weizen
Anlagengröße	kWp	3'000	7'000	6'000	6'000
CAPEX	€/kWp	440	602	705	705
Ertragseinfluss	%	-5	0	-18	-19
Erzeugerpreis	€/t	468	1340	468	214
Landwirtschaftliche Erlöse 25 Jahre	Mio. €	4,786	8,525	4,131	0,318
Einspeisevergütung	€/kWh	0,0505	0,0625	0,0625	0,0625
Stromerlöse 25 Jahre	Mio. €	2,995	8,604	7,378	7,378
Gesamterlöse	Mio. €	7,781	17,128	11,509	7,696
Gesamtinvestitionskosten	Mio. €	1,320	4,214	4,230	4,230
Anteil Erlöse LW an Gesamterlösen	%	61,5	49,8	35,9	4,1
NPV 25 Jahre	€	5.132.952	9.900.825	4.687.090	873.716
IRR	%	29	18	10	3
Amortisationsdauer	j	3	5	9	18

Back-Up: Wirtschaftlichkeitsanalyse – Skaleneffekte (Ø)

Durchschnittlicher Skaleneffekt					
	Einheit	AGRO-PV-Vertikal Kartoffel	AGRO-PV-Hoch > 2,1 m Apfel	AGRO-PV-Hoch > 4 m Kartoffel	AGRO-PV-Hoch > 4 m Weizen
Anlagengröße	kWp	3'000	7'000	6'000	6'000
CAPEX	€/kWp	503	694	817	817
Ertragseinfluss	%	-5	0	-18	-19
Erzeugerpreis	€/t	468	1340	468	214
Landwirtschaftliche Erlöse 25 Jahre	Mio. €	4,786	8,525	4,131	0,318
Einspeisevergütung	€/kWh	0,0505	0,0625	0,0625	0,0625
Stromerlöse 25 Jahre	Mio. €	2,995	8,604	7,378	7,378
Gesamterlöse	Mio. €	7,781	17,128	11,509	7,696
Gesamtinvestitionskosten	Mio. €	1,509	4,858	4,902	4,902
Anteil Erlöse LW an Gesamterlösen	%	61,5	49,8	35,9	4,1
NPV 25 Jahre	Mio. €	4,944	9,257	4,015	0,202
IRR	%	25	15	7	1
Amortisationsdauer	J	4	6	11	23

Back-Up: Wirtschaftlichkeitsanalyse – Variante Kreditfinanzierung

	Einheit	AGRO-PV- Vertikal Kartoffel	AGRO-PV- Vertikal Kleegras	AGRO-PV-Hoch > 2,1 m Apfel	AGRO-PV-Hoch > 4 m Kartoffel	AGRO-PV-Hoch > 4 m Weizen
Anlagengröße	kW _p	3'000	3'000	7'000	6'000	6'000
CAPEX	€/kW _p	503	503	694	817	817
Erzeugerpreis	€/t	468	20	1340	468	214
Gesamtinvestitionskosten	Mio. €	1,509	1,509	4,858	4,902	4,902
NPV 25 Jahre	Mio. €	3,650	- 0,672	5,091	- 0,188	- 4,002
IRR	%	13	- 3	6	0	- 7
Amortisationsdauer	j	9	> 25	14	> 25	> 25