

Anforderungen und Randbedingungen von Agri-Solarthermischen Systemen im Vergleich zu herkömmlicher Freiflächen-Solarthermie und Agri-Photovoltaik

Fabian Feuchter, Michael Seiler, Thorsten Summ, Christoph Trinkl, Wilfried Zörner
Institut für neue Energie-Systeme (InES) der Technischen Hochschule Ingolstadt
Esplanade 10, D-85049 Ingolstadt
Tel.: +49 841 9348-5202
E-Mail: Fabian.Feuchter@thi.de
Internet: www.thi.de/go/energie

Abstract

Freiflächen-Solarthermie kann einen wichtigen Beitrag zur Dekarbonisierung der Wärmeversorgung leisten. Die Verfügbarkeit geeigneter Flächen begrenzt jedoch einen schnellen Ausbau. Agri-Photovoltaik (Agri-PV) als Konzept der Doppelnutzung landwirtschaftlicher Flächen bietet hier einen innovativen Lösungsansatz für die Photovoltaik. Eine solarthermische Umsetzung dieses Konzepts – Agri-Solarthermie (Agri-ST) – wurde bislang kaum betrachtet. Ziel dieser Arbeit ist es, qualitative Anforderungen und Randbedingungen für Agri-Solarthermie-Anlagen zu definieren. Dazu werden bestehende Anforderungen aus Agri-PV-Anlagen auf solarthermische Anwendungen übertragen und um spezifische Aspekte der Freiflächen-Solarthermie ergänzt. Anhand eines Fallbeispiels zur vertikalen Agri-Solarthermie mit Isolierglaskollektoren werden die Kriterien konkretisiert. Die Ergebnisse zeigen, dass sich Anforderungen der Agri-PV auf Agri-ST übertragen lassen und keine Ausschlusskriterien gegen eine technisch und ökonomisch sinnvolle Umsetzung bestehen. Vertikale Agri-ST mit Isolierglaskollektoren erscheint als vielversprechendes Konzept – insbesondere aufgrund der Bifazialität und des geringen Anpassungsaufwands. Für die Weiterentwicklung von Agri-ST sollten eine klare Konzeptdefinition sowie die Analyse potenzieller Umweltwirkungen und Synergien im Fokus stehen.

Hintergrund und Zielsetzung

Die Dekarbonisierung der Wärmeversorgung spielt eine zentrale Rolle in der Energiewende. Solarthermie (ST) in Wärmenetzen hat das Potenzial, eine wichtige Säule einer klimaneutralen Wärmeversorgung zu werden. Thelen et al. prognostiziert beispielsweise für 2045 einen Anteil der solaren Wärmeerzeugung von 27 bis 40 TWh [1]. Um dieser Prognose gerecht zu werden, müsste die installierte Kollektorfläche in den kommenden 20 Jahren um das 3- bis 4-fache wachsen. 2023 lieferten Solarthermie-Systeme in Deutschland rund 9,3 TWh an Wärme [2]. Auch die *Deutsche Energie-Agentur (dena)* schreibt in ihrem Impulspapier zu den Leitplanken für die kommende Legislaturperiode, dass Formen der direkten Wärmeerzeugung (Solar- und Geothermie) eine zentrale Rolle spielen werden, um die Dekarbonisierung von Wärmenetzen voranzutreiben [3].

Mit dem Ausbau der Solarthermie für eine erfolgreiche Energiewende, insbesondere der Freiflächen-Solarthermie, steigt die Relevanz des Flächenkonflikts zwischen

landwirtschaftlicher Nutzung und solarer Energieerzeugung. Freiflächen-Solarthermie ist im Gegensatz zur Photovoltaik stärker auf Siedlungsnähe angewiesen, um Wärmetransportverluste gering zu halten. Dies erweist sich als Herausforderung bei der Flächenfindung für den weiteren Ausbau. Eine mögliche Lösung für eine effizientere und nachhaltige Landnutzung ist das Konzept der Agri-Photovoltaik (Agri-PV), das die gleichzeitige Nutzung von Flächen für solare Energiegewinnung und Landwirtschaft beschreibt. Bisher gibt es jedoch keine solarthermische Umsetzung dieses Konzepts. Erste Simulationsstudien von Summ et al. zeigten einen vergleichbaren thermischen Jahresertrag wie konventionelle Freiflächen-ST [4]. Gleichzeitig fehlen bisher jedoch grundlegende Beschreibungen der Systemanforderungen und Randbedingungen für den neuen Ansatz der Agri-Solarthermie (Agri-ST).

Ziel dieser Untersuchung ist daher die Ableitung von Anforderungen und Randbedingungen für Agri-Solarthermie-Systeme anhand des Kenntnisstands bei Agri-PV-Systemen und der herkömmlichen Freiflächen-Solarthermie. Im ersten Schritt wird die Flächenproblematik in Deutschland aus raumplanerischer Sicht aufgegriffen. Anschließend erfolgt die Beschreibung von Anforderungen für Agri-PV-Anlagen basierend auf der DIN SPEC 91434:2021-05 [5] sowie die Beschreibung von gängigen Agri-PV-Anlagenkonzepten. Daraufhin werden für die Freiflächen-Solarthermie eingesetzte Technologien skizziert sowie deren Anforderungen erläutert. Die Systemanforderungen der bereits existierenden Systeme werden verglichen und auf ihre Übertragbarkeit und Adaptierbarkeit hin zu Agri-Solarthermie-Systeme geprüft. Die Anforderungen werden anhand des Beispiels der vertikalen Agri-ST mit Isolierglaskollektoren konkretisiert. Abschließend erfolgt eine perspektivische Einordnung zur Agri-ST.

Raumplanung und Freiflächen-Solarthermie: Status Quo und Perspektiven in Deutschland

Bei der Realisierung von Freiflächen-ST-Anlagen ist das Standort- und Flächenmanagement ein wichtiger Aspekt in der erfolgreichen Umsetzung eines Projekts. Für die Flächensuche spielen energiewirtschaftliche Kriterien, wie die Entfernung zum Wärmenetz bzw. Wärmeabnehmer, die geografische Lage, Ausrichtung der Fläche und der Bodenpreis eine Rolle. Des Weiteren sind akzeptanzbezogene Kriterien, welche das Konfliktpotenzial der Anlage mit verschiedenen Akteuren (Anwohner, Gewerbe, Naturschutz, Landwirtschaft) beschreiben, ebenfalls von hoher Bedeutung. Bei der Planung muss beachtet werden, inwiefern die Anlage mit Wohngebieten oder Erholungsnutzungen interferiert, ob die Flächen in Konkurrenz mit gewerblicher Nutzung oder dem Naturschutz stehen, Ausgleichsflächen geschaffen werden müssen, oder ob bei landwirtschaftlichen Flächen eine Weiternutzung möglich ist. In rechtlicher Hinsicht ist bestehendes Planungsrecht zu beachten (z.B. Flächennutzungsplan oder Bebauungsplan) sowie rechtliche Ausschlussgründe für gewisse Standorte. All diese Kriterien sollten beachtet werden, um eine Freiflächen-Anlage zu realisieren [6].

Gemäß einer Untersuchung von Trier et al. aus dem Jahr 2016 haben die Umsetzungserfahrungen solarer Wärmenetze in Dänemark in den letzten Jahrzehnten

gezeigt, dass vor allem im ländlichen und sub-urbanen Raum solarthermisch unterstützte Nahwärmesysteme umgesetzt werden; hier vorrangig in Siedlungen mit einer Einwohnerzahl von ca. 4.000-5.000 Einwohnern und einem Wärmebedarf von bis zu 60.000 MWh im Jahr. Die Kollektorfelder liegen dabei in einem typischen Abstand von 200 m zur Siedlung. Im lokalen Kontext sind hier häufig Energiegenossenschaften eingebunden, welche die Wärme nicht-profitorientiert an die Kunden vor Ort verkaufen. Der durchschnittliche Wärmepreis für die Kunden lag bei 64 €/MWh [7].

Die Beispiele zeigen, dass Solarthermie ein grundlegender Baustein für eine kostengünstige Wärmeherzeugung im ländlichen Raum sein kann. Die hohe Bedeutung des ländlichen Raums für die Energiewende hat auch das *European Environmental Bureau (EEB)* herausgearbeitet. In einer Untersuchung der Flächenpotenziale erneuerbarer Energien in Europa für den Ausbau von Photovoltaik (Dach und Freifläche) sowie Wind (On- und Offshore) zeigte sich, dass im deutschen Kontext 71% der Flächen dafür im ländlichen Raum liegen [8]. Daraus lässt sich schließen, dass die Akzeptanz der ländlichen Bevölkerung ein wichtiges und sensibles Kriterium ist. Akzeptanz kann vor allem dann geschaffen werden, wenn Standorte nicht nur für die Energieproduktion vorgesehen sind, sondern multifunktional genutzt werden. Die Agri-PV ist zum Beispiel ein solches multifunktionales Nutzungskonzept und bietet, wie oben erwähnt, Synergien zwischen Landwirtschaft und Energieerzeugung, indem sie unter anderem dazu beitragen kann, die Verdunstung zu verringern und vor zu intensiver Sonneneinstrahlung zu schützen [8]. Die Studie des *EEB* kommt zu dem Schluss, dass im deutschen Kontext klare Kriterien zur Umsetzung von Agri-PV und auch eine Priorisierung von Agri-PV-Anlagen eine wichtige Rolle in der zukünftigen Raumplanung spielen sollten [7].

Im Kontext der Freiflächen-Solarthermie stellt sich die Frage, welche Relevanz diese Aspekte für die in diesem Beitrag durchgeführte Analyse haben. Obwohl die Bereitstellung solarer Wärme großes Potenzial hat und die solarthermische Umwandlung die effizienteste Solartechnologie ist, gibt es einige Hürden in der Umsetzung von Freiflächen-Anlagen, welche den Ausbau merkbar hemmen. Freiflächen-ST konkurriert, wie oben erwähnt, häufig mit dem Siedlungsbau und landwirtschaftlichen Flächen, aufgrund ihrer techno-ökonomisch bedingten Nähe zu Wärmesenken. Die Ausweisung geeigneter Flächen in der Raum- und Bauleitplanung erfolgt bislang nur unzureichend. Auch eine Privilegierung nach §35 BauGB Absatz 1 [9], welche das Genehmigungsverfahren beschleunigt, ist schwierig zu realisieren, da eine baurechtliche Privilegierung nicht abschließend geklärt ist [10, 11]. Um hierbei Sicherheit für den Projektierer zu schaffen, muss dieser ein bauleitplanerisches Verfahren durchlaufen, das 1-2 Jahre dauern kann [11]. Außerdem sind steuer- und erbschaftsrechtliche Maßnahmen, welche die Wirtschaftlichkeit verbessern, aktuell eher auf PV-Anlagen ausgerichtet [11].

Diese Punkte zeigen, dass Flächenkonkurrenz beim Ausbau von Freiflächen-ST ein wesentliches Hindernis ist. Auch im Sinne der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie ist es ein zentrales umweltpolitisches Anliegen, den Flächenverbrauch durch Siedlungs- und Verkehrsflächen (wozu auch Freiflächen-Solaranlagen zählen) von aktuell 52 Hektar pro Tag auf 30 Hektar pro Tag bis 2030 zu reduzieren [12]. Es stellt sich also

ein Zielkonflikt zwischen den Nutzungsarten im siedlungsnahen Raum heraus, der den Ausbau der Solarthermie und auch die damit verbundene Stärkung der lokalen Wertschöpfungsketten im Anlagenbau einschränkt. Die Argumente beider Seiten – diejenige, welche die Projekte entwickeln wollen und diejenigen, die den Außenbereich vor einer überwiegend gewerblichen Nutzung schonen wollen – sind nachvollziehbar. Der Zielkonflikt zeigt aber, wie wichtig eine multifunktionale sozial akzeptierte Landnutzung zukünftig sein wird.

Die Privilegierung der Agri-PV verdeutlicht, dass auch die Solarthermie von diesen Entwicklungen profitieren kann. Agri-PV-Anlagen sind vom Gesetzgeber baurechtlich privilegiert, sofern sie nicht mehr als 2,5 ha Land in Anspruch nehmen und einen räumlich-funktionalen Zusammenhang zum Hofbetrieb eines Landwirtes darstellen. Weiterhin ist die gesamte Anlage danach weiterhin dem land- und forstwirtschaftlichen Vermögen zuzurechnen, was wirtschaftliche Vorteile für den Flächenbesitzer mit sich bringt. Daraus ergibt sich ein weiterer Vorteil: die Flächen können für die Agrarbeihilfen der EU weiterhin mit bis zu 85% angerechnet werden [13]. Da im *BauGB* die Nutzung von solarer Strahlungsenergie beschrieben ist, lässt sich der Privilegierungsstatbestand somit prinzipiell auch auf solarthermische Freiflächen-Anlagen übertragen (vgl. [9]).

Agri-Solarthermie bietet im deutschen Kontext mehrere Vorteile: a) Eine Doppelnutzung der Fläche ermöglicht Synergien zwischen den Nutzungsarten, was die Akzeptanz der Anlagen fördert und somit zum Ausbau klimafreundlicher Wärmebereitstellung beiträgt, b) Projektentwickler finden einen leichteren Zugang zu Flächen im siedlungsnahen Bereich, ohne die Akzeptanz der Bevölkerung zu gefährden, c) die landwirtschaftliche Produktion kann weiterhin stattfinden, und d) aufgrund von allgemein geringen Wärmegestehungskosten von Freiflächen-ST-Anlagen profitiert die lokale Bevölkerung von günstigen Wärmepreisen, welcher zusätzlich noch unabhängig von Strom- und Brennstoffpreisen ist.

Um diese Entwicklungen im Solarthermie-Bereich zu fördern und die Branche wettbewerbs- und zukunftsfähig zu halten, sollte sich die Solarthermie-Branche mit den bisherigen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten der Agri-PV beschäftigen, um hiermit auch klare Definitionen und Anforderungen und Randbedingungen für Agri-ST abzuleiten und die Umsetzung innovativer Pilotanlagen forcieren zu können.

Systemanforderungen für Agri-PV-Anlagen

Die DIN SPEC 91434:2021-05 [5] ist eine technische Spezifikation, welche das Ziel hat, Anforderungen für die landwirtschaftliche Hauptnutzung im Bereich der Agri-PV festzulegen. Sie fokussiert sich dabei auf Anforderung an die Planung, den Betrieb, die Betriebsüberwachung sowie das Festlegen von Messkennzahlen für Prüfverfahren von Agri-PV-Anlagen, um deren Qualität zu sichern [5]. Auch wenn diese bisher noch keiner offiziellen Norm entspricht, ist sie maßgebend für die Definition von Agri-PV-Anlagen und deren Funktionsweise in deutschen Gesetzestexten wie z.B. dem Baugesetzbuch (BauGB) und dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG).

Agri-PV ist definiert als die kombinierte Nutzung einer Landfläche, welche primär für die landwirtschaftliche Produktion vorgesehen ist und sekundär für die Stromproduktion mittels einer PV-Anlage (vgl. [5]).

Demgemäß gilt, dass der landwirtschaftliche Referenzertrag der Gesamtprojektfäche mindestens 66 % betragen muss. Das heißt, dass im Vergleich zum offenen Feld ohne

PV-Anlage der Ernteertrag nur um 1/3 reduziert sein darf. Die Reduktion des Ernteertrages ergibt sich durch den Flächenverlust von landwirtschaftlich nutzbarer Fläche durch die PV-Aufbauten.

Für Agri-PV-Anlagen gibt es zwei Kategorien, welche in Abbildung 1 dargestellt sind:

- Kategorie 1 (hochaufgeständert) beschreibt landwirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten bei PV-Anlagen, die mit lichter Höhe aufgeständert sind, wo die Bewirtschaftung unterhalb der Anlage erfolgt. Als lichte Höhe ist hierbei die Distanz zwischen dem Boden und der Unterkante des Solarmoduls mit 2,10m definiert. Der Flächenverlust nutzbarer landwirtschaftlicher Fläche darf maximal 10% der Gesamtprojektfäche betragen.
- Kategorie 2 (bodennah) beschreibt landwirtschaftliche Nutzungsmöglichkeiten bei PV-Anlagen, die eine bodennahe Aufständigung haben und bei denen die Bewirtschaftung zwischen der PV-Installation erfolgt. Die lichte Höhe ist hierbei kleiner als 2,10 m. Der Flächenverlust nutzbarer landwirtschaftlicher Fläche darf maximal 15% der Gesamtprojektfäche betragen

Charakteristiken dieser beiden Systemtypen sind eine fixe Positionierung oder eine ein- oder zweiachsige Modulnachführung. Landwirtschaftliche Anwendungsfelder sind die Nutzung als Dauergrünland oder der Ackerbau. Übliche Kulturen für eine solche Nutzungsform sind die Beweidung mit Weidevieh, Heuwirtschaft oder auch der Anbau von Feldfrüchten wie Getreide, Ölpflanzen und einjährigen Kulturen. Die Bearbeitung solcher Flächen findet unter der Anwendung eines Fruchtfolgezyklus ab. Meistens werden diese Flächen mit landwirtschaftlichen Großmaschinen bearbeitet [14]. In Tabelle 1 sind die Anforderungen der Agri-PV beschrieben in Bezug auf die drei Hauptanforderungsgruppen: Landwirtschaftliche Hauptnutzung, Planung und Technik sowie Installation, Betrieb und Wartung.

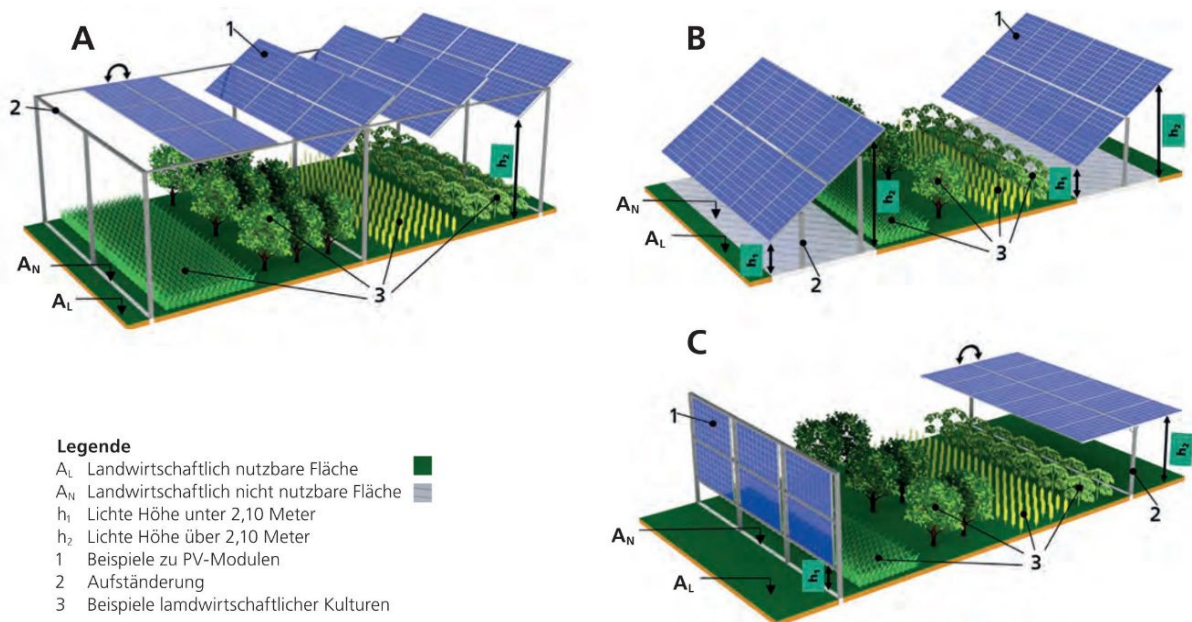


Abbildung 1: Verschiedene Agri-PV-Systeme (A - Darstellung der Kategorie I; B - Darstellung der Kategorie II, Variante 1; C - Darstellung zu Kategorie II, Varianten 1 und 2 [14])

Tabelle 1: Anforderungen der Agri-PV gemäß DIN SPEC 91434:2021-05 [5]

Anforderungsbereich	Hauptanforderung	Spezifikation
Landwirtschaftliche Hauptnutzung		
Nutzbarkeit der Fläche	Erhalt der landwirtschaftlichen Nutzbarkeit trotz Anlagenbau.	Geplante Landnutzungsform (z.B. Dauergrünland, Ackerbau etc.) und Pflanzenproduktion (z.B. Fruchtfolge) muss in einem landwirtschaftlichen Nutzungskonzept dargelegt werden. Nutzungsänderung mit dem Bau der Anlage ist möglich, aber nicht z.B. von Ackerbau zu Grünland.
Flächenverlust	Maximal 10 % bei Kategorie I, 15 % bei Kategorie II.	Gemeint ist hier der Flächenverlust durch Aufbauten und die Unterkonstruktion in Bezug auf die Gesamtprojektfäche.
Lichtverfügbarkeit/-homogenität	Sicherstellung durch Gestaltung der PV-Anlage; Anpassung an Kulturen.	Die Tageslichtverfügbarkeit muss an die Pflanze oder das Nutztier angepasst werden.
Wasser- verfügbarkeit	Homogene Niederschlagsverteilung, ggf. Bewässerungssystem.	Wasserverfügbarkeit und Regenwasserverteilung ist nach pflanzlicher Erzeugung zu richten.
Bodenerosion	Maßnahmen gegen Erosion durch Wasserabtropfen; z. B. Regenwasserverteiler.	Erosion und Verschlammung durch Wasserabtropfkanten muss vermieden werden. Die Auffangeinrichtung muss der Pflanzenkultur angepasst sein.
Rückbaubarkeit	Rückstandslose Entfernung der Anlage nach Nutzungsende.	Rückbaubarkeit, allen voran der Fundamentierung und Verankerung, muss sichergestellt sein. Landwirtschaftliche Nutzung muss im Nachhinein wieder möglich sein. Bei Verschlechterung der Bodenstruktur müssen geeignete Maßnahmen ergriffen werden.
Wirtschaftlichkeit	Tragfähiges Konzept für den landwirtschaftlichen Betrieb erforderlich.	Nachweis des landwirtschaftlichen Erwebszweckes. Erfüllung des Referenzertrages der Fläche.
Landnutzungseffizienz/Referenzertrag	Ertrag der Kulturpflanzen muss mindestens 66% des Referenzertrags betragen.	Ertragsreduktion muss im landwirtschaftlichen Nutzungskonzept erfasst werden. Bei Dauerkulturen/Grünland gilt der ermittelte Ertrag der letzten 3 Jahre. Bei neuer Bewirtschaftung der Kulturen gelten Durchschnittserträge der letzten 3 Jahre aus einschlägigen Veröffentlichungen.
Planung und Technik		
Technisches System	Aufständigung der Anlage entweder in lichter Höhe oder bodennahe mit Bewirtschaftung zwischen den Reihen	Kategorie I beschreibt Systeme, bei denen die Bewirtschaftung mit mindestens lichter Höhe (2,10m) und unter der Agri-PV Anlage möglich ist. Kategorie II beschreibt Systeme mit bodennaher Aufständigung, das heißt dass die Aufständigung kleiner als 2,10m ist und die Bewirtschaftung zwischen den Reihen erfolgt.
Aufständigung	Die Aufständigung darf die landwirtschaftliche Nutzung nicht einschränken und eine	Gleichmäßige Verteilung der PV-Module auf die Gesamtprojektfäche. Der Abstand zwischen einzelnen Pfosten muss so groß sein, dass bisherige Landnutzungsform und Pflanzenproduktion weiterhin

	Bearbeitbarkeit der Fläche sicherstellen.	möglich sind. Hoch aufgeständerte Anlagen müssen der Arbeitsschutzgesetzgebung entsprechen und in lichter Höhe aufgeständert sein. Für bodennahe Agri-PV ist keine lichte Höhe der Aufständering notwendig. Mechanische Beschädigung der Haupttragstruktur sollte vorgebeugt werden durch z.B. Rammschutz.
Tragwerk und Standsicherheit	Einhaltung der Eurocodes für statische Sicherheit.	Tragwerk ist nach semiprobabilistischem Sicherheitskonzept des Eurocodes auszulegen.
PV-Modultechnik	Technik muss an Landwirtschaft angepasst sein. Lichtdurchlässigkeit und -homogenität muss möglichst hoch sein	Verschiedene Modultechniken und Bauformen können verwendet werden. Modultechnik, Zellzwischenräume und Verkapselungsmaterialien müssen an landwirtschaftliche Nutzung angepasst sein.
BOS-Komponenten	Keine Beeinträchtigung der Landwirtschaft; Kabelverlegung sicher unterirdisch.	Standort der BOS-Komponenten (Balance of System - Komponenten = alle Komponenten einer PV-Anlage) darf landwirtschaftliche Nutzung nicht beeinträchtigen. Erdverlegung der Kabel erfolgt nach Mindestdtiefe gemäß DIN VDE 0100-520, um Sicherheit vor Pflug und anderen Landmaschinen zu gewährleisten.
Installation, Betrieb, Wartung		
Installation	Schutz vor Bodenschäden und Verdichtung; Baustelle auf Trockenheit abstimmen.	Verschlechterung des Bodens muss ausgeschlossen sein. Schutz vor auslaufenden Betriebsstoffen ist zu beachten.
Abnahme	Einhaltung der technischen und landwirtschaftlichen Vorgaben sicherstellen.	Einhaltung des landwirtschaftlichen Nutzungskonzeptes. Verlegung der Kabel in sicherer Tiefe vor Tieren und Landmaschinen. Einhaltung des maximalen Flächenverlusts durch Bebauung. Einhalten der Montagehöhe der Module mit lichter Höhe und Sicherheit des Tragwerkes
Betrieb/Wartung	Regelmäßige Wartung, Vermeidung von Schäden durch Landwirtschaft.	Notwendige Wartungen müssen im Betriebshandbuch festgehalten werden. Empfohlen ist separates Anlagenbetriebsbuch.
Reinigung	Nur bei starker Verschmutzung; Lebensmittelrecht beachten.	Bei starker Verschmutzung Reinigen, um Ertragsverluste zu minimieren. Reinigung nur, wenn notwendig, um Belastung oder Schäden an der Anlage zu vermeiden. Bei Verwendung von Reinigungsmitteln müssen Lebensmittel-, Futtermittel- und Arzneimittelrechtlichen Bestimmungen beachtet werden.

Systemanforderungen von Freiflächen-Solarthermie-Anlagen

Die Freiflächen-Solarthermie nutzt unbebaute Flächen zur Erzeugung von Wärme durch Solarthermie-Kollektoren, die thermische Energie für Nah- und Fernwärme, Industrie oder Gebäude bereitstellen. Die Einbindung erfolgt entweder zentral in unmittelbarer Nähe eines Heizhauses oder dezentral in einem Wärmenetz. In Tabelle 2 sind Anforderungen von Freiflächen-Anlagentypen beschrieben.

Tabelle 2: Anforderungen von Freiflächen-Solarthermie-Anlagen gemäß [6, 7, 15]

Anforderungsbereich	Hauptanforderung	Spezifikation
Relevante Aspekte des Standort- und Flächenmanagements		
Entfernung zum Wärmenetz / Wärmesenke	Wirtschaftlich darstellbare Anbindung an eine Wärmesenke.	Das Kollektorfeld befindet sich typischerweise innerhalb von 200 m Entfernung zur Siedlung/Wärmesenke. [7]
Energiekonzept	Passende Kombination aus Kollektorfeld und Energiespeicher mit dem Wärmebedarfsprofil und den baulichen Randbedingungen des Standorts	Anhand baulicher Randbedingungen und dem Wärmebedarf: Auswahl des passenden Anlagenkonzepts, d.h. Festlegen der Kollektortechnologie und der Speichergröße. Abschließend die bauliche Integration prüfen.
Planung und Technik		
Solarkollektoren & Dimensionierung	Einsatz von zertifizierten Kollektoren und dimensioniertes Kollektorfeld	Verwendung von Solar Keymark-zertifizierten Kollektoren gemäß DIN EN ISO 9806:2018-04; Nachweise über die Zertifizierung sowie Varianten zur Dimensionierung (z. B. Auslegung zur Deckung von XX % des Jahreswärmebedarfs)[15].
Reihenabstand und Ausrichtung der Kollektoren	Energetische und flächentechnische Optimierung gemäß den Standortbedingungen.	Der Reihenabstand wird so gewählt, um den Jahresertrag zu optimieren. Um eine Fläche effizient zu nutzen ist der Reihenabstand so gering wie möglich zu halten. Die Ausrichtung erfolgt in nördlichen Sphären meistens in Südausrichtung mit einem Neigungswinkel von 30° bis 45°. Dies ist abhängig von der Geländetopologie.
Pufferspeicher	Notwendigkeit und Dimensionierung eines Pufferspeichers	Falls als notwendig bzw. ökonomisch sinnvoll erachtet: Angabe von Speichervolumen (z. B. XY m³), maximaler Betriebstemperatur (z. B. XY °C), Fundamentdimensionierung und Standort (in unmittelbarer Nähe zur Technikzentrale)[15]
Netzhydraulik & Schnittstellen	Hydraulische Anbindung an das Wärmenetz	Einsatz eines Wärmeübertragers (bei Trennung vom Netz) mit Vorgaben zu Vor- und Rücklauftemperaturen, Einsatz von frequenzgeregelten Pumpen sowie Einbindung eines geeichten Wärmemengenzählers an

		der Leitwarte. Technische Schnittstellen zur Integration in bestehende Wärmenetze, detaillierte Planung von Wärmeübertragern, Pumpenanlagen und Zählerintegration.[15]
Komponenten der Feldhydraulik	Vermeidung von Leckage	Bei unterirdischen Leitungen ist ein Kunststoffmantelrohr mit Leckageüberwachung zu verwenden. [6]
Installation, Betrieb, Wartung		
Betriebs- & Sicherheitskonzept	Erstellung eines umfassenden Betriebs-, Wartungs- und Sicherheitskonzepts	Konzept zur Gewährleistung des sicheren Betriebs – u. a. Maßnahmen für Stagnation, Wiederanlauf, Übertemperatur, Druckschwankungen, Frostschutz sowie Notfallregelungen (z. B. Stromausfall von 12 Stunden)[15]
Ertragssimulation & Garantien	Ermittlung des Systemertrags, Festlegung von Garantien und Schadenersatzregelungen bei Nichterreichen der Garantiewerte	Garantie auf den solaren Nutzwärmeertrag (z. B. 85 % des ermittelten Systemertrags über 5 Jahre) sowie Regelungen zu Schadenersatzleistungen (z. B. xy €/MWh bei Abweichungen); ggf. Leistungskurven-Garantie (ISO TC180/SC4, ISO 24194) (vgl.[15])
Installation und Inbetriebnahme	Fachgerechte Installation und Inbetriebnahme	Detaillierter Ablaufplan für Montage, Prüfprotokolle, Übergabe-Dokumentation, Schulung des Betriebspersonals und vertraglich geregelte Service- sowie Wartungsintervalle.
Betriebskontrolle und Wartung	Fachgerechte Instandhaltung	Langfristige Monitoringkonzepte, vorausschauende Wartungsstrategien.

Definition der Anforderungen und Randbedingungen für Agri-Solarthermie-Konzepte

Anhand der Systemanforderungen für Agri-PV-Anlagen lassen sich drei wesentliche Kategorien für die Anforderungen von Agri-ST-Systemen definieren: die landwirtschaftliche Hauptnutzung, Planung & Technik sowie Installation, Betrieb und Wartung. Diese Kategorien mit ihren jeweiligen Unterkriterien definieren die Grundlagen für Agri-Solarthermische Konzepte. Abbildung 2 gibt einen Überblick über die erwähnten Kriterien in den vorigen Kapiteln. Dabei ist die Umsetzbarkeit eines Kriteriums über eine Farbskala dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sowohl solarthermische Freiflächen-Anlagen auch als Agri-ST-Konzepte in Bezug auf Ihre Anforderungen umgesetzt werden können, sofern gewisse Anpassungen umgesetzt werden. Im Folgenden soll darauf eingegangen werden, welche Änderungen bei der Ausgestaltung einer Agri-ST-Anlage von Bedeutung sind oder einer ausführlicheren Betrachtung bedürfen.

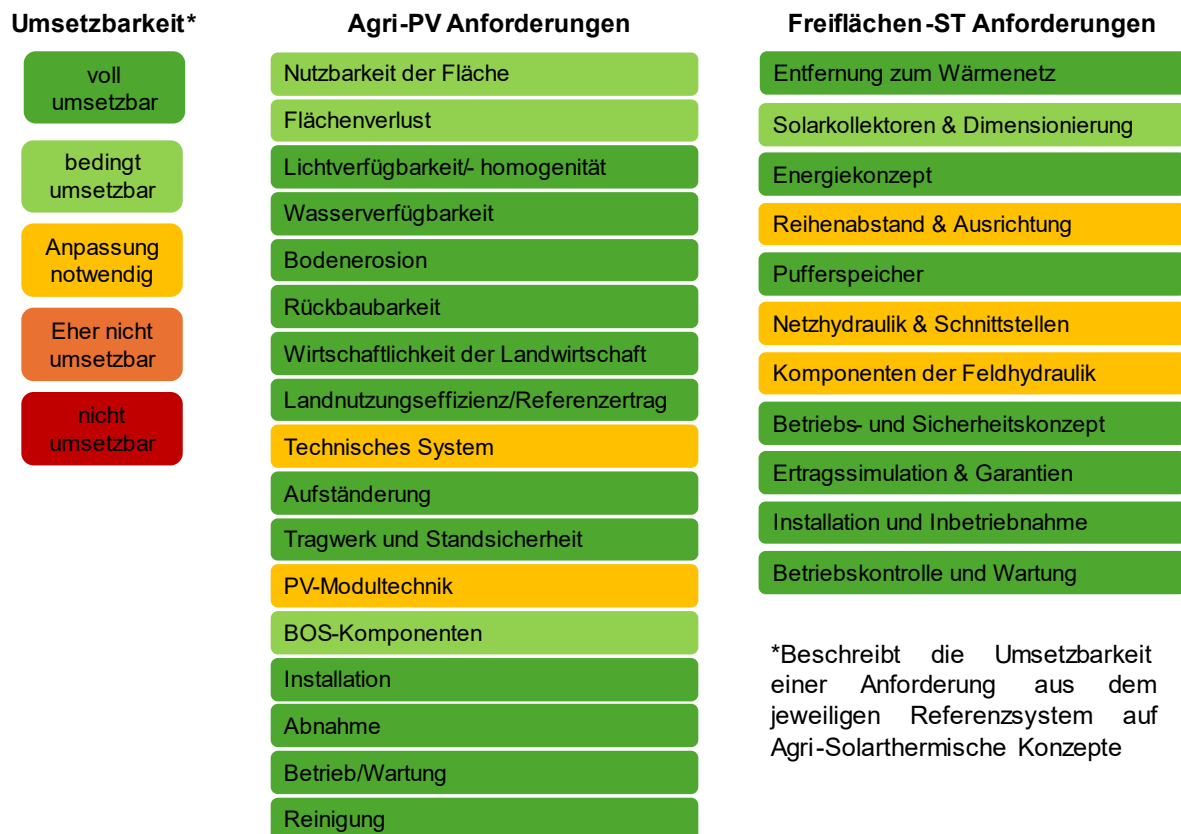


Abbildung 2: Bewertung der Umsetzbarkeit von Anforderungen und Randbedingungen der Agri-PV- und Freiflächen-Solarthermie-auf Agri-Solarthermische Systeme

Die *Nutzbarkeit der Fläche* sowie der *Flächenverlust* definieren sich darüber, dass die landwirtschaftliche Hauptnutzung erhalten bleibt und der maximale Flächenverlust je nach Kategorie bis zu 15% der Referenzfläche des Projekts beträgt. Bei Agri-ST-Projekten muss speziell darauf geachtet werden, dass Rohrleitungen nicht der Bearbeitbarkeit im Wege stehen. Dies hängt direkt mit dem Kriterium der *hydraulischen Anbindung* zusammen. Hier muss sichergestellt werden, dass Rohrleitungen sowie Anlagenkomponenten nicht im Bearbeitungsradius von landwirtschaftlichen Geräten oder auf der Feldfläche verlaufen. Weiterhin sollte die Anlage so gestaltet sein, dass Verbrennungen an heißen Rohrleitungen oder eine Beschädigung der Hydraulik durch Flächenbenutzer (z.B. Tiere, Menschen) ausgeschlossen ist.

Bei den Nutzungsanforderungen der *BOS-Komponenten* (Balance of System; Generatoranschlusskasten, Wechselrichter und weitere Bauteile der PV-Anlage) ist eine Mindestverlegetiefe von 60 cm nach DIN VDE 0100-520 vorgegeben [5]. Diese muss auch bei Agri-ST-Anlagen gelten, um eine Beschädigung durch landwirtschaftliche Geräte zu vermeiden. Da Sammelleitungen von ST-Anlagen ab einer gewissen Anlagengröße Nenndurchmesser von mehr als 125 mm haben können, ist es sinnvoll diese noch tiefer zu legen. Bei Agri-ST- wie auch Agri-PV-Anlagen ist eine ständige Bearbeitung der oberen Erdschicht möglich, hier kann es sinnvoll sein, etwas oberhalb der Leitungsebene sogenannte Trassenwarnbänder einzulegen (vgl. [16]), um eine mögliche Gefahr durch Beschädigung der Rohrleitungen durch den Arbeiter rechtzeitig zu signalisieren. Außerdem müssen

die Standorte zusätzlicher Komponenten, wie der Übergabestation so gewählt sein, dass auch hier die landwirtschaftliche Nutzung nicht beschränkt ist.

In Bezug auf das *technische System* bzw. auch den Punkt der *PV-Modultechnik* bei Agri-PV-Anlagen muss im Vergleich zu Agri-ST-Konzepten die Realisierbarkeit verschiedener Solarkollektortypen spezifisch geprüft werden. Während die meisten eingesetzten PV-Module Standardgrößen haben, muss bei den einzelnen Kollektortypen der Einsatz in Abhängigkeit des Systems geprüft werden. Relevant sind hierbei die Kollektortechnologie (z.B. monofaziale oder bifaziale Strahlungsaufnahme), das Gewicht und die Größe der Kollektoren (beeinflusst die Kosten der Unterkonstruktion) sowie Umgebungseinflüsse durch diese in Bezug auf Lichtverteilung, Mikroklima, etc. Im Folgenden werden zusätzlich zu den übertragenen Anforderungen aus der Agri-PV nun spezifische technische Anforderungen aus dem Bereich der Freiflächen-Solarthermie betrachtet. In Bezug auf das Kriterium *Solarkollektoren & Dimensionierung* muss beachtet werden, dass diese nach dem Solar Keymark® – Schema zertifiziert sind [15]. Agri-ST-geeignete Kollektoren müssen hier im gegebenen Falle noch eine Zertifizierung durchlaufen. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Umsetzbarkeit verschiedener Kollektortypen. Für die Umsetzung als Agri-ST-System eignen sich derzeit am ehesten Isolierglaskollektoren, welche eine bifaziale vertikale Integration mit geringem Anpassungsaufwand und daher wenig Einschränkungen ermöglichen. Vakuumröhrenkollektoren stellen aufgrund ihres geringen Gewichts, im Vergleich zu Flachkollektoren, eine prüfbare Variante für hochaufgeständerte Systeme dar. Aufgrund der Bauart mancher Röhrentypen (z.B. Sydney-Röhre oder Heat Pipes) würden sich diese auch für eine bifaziale vertikale Aufstellung eignen, da hier auch eine durchgehende Transparenz vorliegt. Hierzu benötigt es aber konstruktive Anpassungen. Eine Umsetzung in dieser Bauweise existiert noch nicht. Außerdem sollten auch die Auswirkungen möglicher Steinschläge aus der landwirtschaftlichen Bearbeitung beachtet werden.

Tabelle 3: Einschätzung zur Umsetzbarkeit verschiedener Freiflächen-Typen als Agri-ST-Anlage

Freiflächen-Kollektortyp	Umsetzbarkeit als Agri-Solarthermie-Anlage
Flachkollektoren (Rahmen- oder Wannenbauweise)	• Hochaufgeständert anspruchsvoll, da Kollektoren im Vergleich zu PV-Modulen deutlich schwerer.¹ • Vertikale Aufstellung bei fehlender Bifazialität nicht sinnvoll, da zwei Kollektoren (Ost- und West) erforderlich. • Bewirtschaftung in südausgerichtetem System zwischen den Reihen nicht flächeneffizient in energetischer und landwirtschaftlicher Perspektive.
Vakuumröhrenkollektoren	• Hochaufgeständert theoretisch realisierbar, da das spezifische Gewicht nur mäßig höher ist als das von PV-Modulen². Dies muss aber mit Gesamtmaßen des Kollektors betrachtet werden.

¹ Zum Beispiel hat ein Flachkollektor der Marke Savosolar Oyi ein spezifisches Flächenleergewicht von 37,5 kg/m² (vgl.[17]). Dies entspricht fast dem dreifachen von PV-Modulen, welche je nach Typ zwischen 10-15 kg/m² wiegen können (vgl. [18]).

² Als Referenz dient hier ein Vakuumröhrenkollektor der Marke Ritter XL Solar mit einem Flächenleergewicht von 16,1 kg/m² (vgl. [19]).

	• Vertikale Aufstellung möglich, da auch die Bifazialität gegeben, bei konstruktiven Anpassungen. • Bewirtschaftung in südausgerichtetem System zwischen den Reihen nicht flächeneffizient in energetischer und landwirtschaftlicher Perspektive.
Parabolinnenkollektoren	• Hochaufgeständert realisierbar, Leitungsführung muss angepasst werden • Bodennahe Agri-ST anspruchsvoll aufgrund der hohen Bodenverdichtung durch die Konstruktion. • Bewirtschaftung in südausgerichtetem System zwischen den Reihen nicht flächeneffizient in energetischer und landwirtschaftlicher Perspektive
Isolierglaskollektoren	• Hochaufgeständert anspruchsvoll aus Gewichtsgründen (Eigengewicht bei ca. 26 kg/m²) • Vertikale Aufstellung möglich, da auch die Bifazialität gegeben, bei konstruktiven Anpassungen. • Bewirtschaftung in südausgerichtetem System zwischen den Reihen nicht flächeneffizient in energetischer und landwirtschaftlicher Perspektive.

Anforderungen bezüglich der *Netzhydraulik & Schnittstellen* betreffen ebenfalls die hydraulische Anbindung an ein Wärmenetz. Dies schreibt den Einsatz eines Wärmeträgermediums vor sowie auch die klare Festlegung von Vor- und Rücklauftemperaturen für die ST-Anlage. Ein weiterer Aspekt ist die Auswahl des Wärmeträgermediums. In konventionellen Freiflächen-ST-Anlagen kommen unter anderem biologisch abbaubare Wasser-Glykol-Gemische zum Einsatz. Hier ist zu prüfen, ob sich diese auch im landwirtschaftlichen Kontext verwenden lassen. Eine Rolle spielt hier, inwiefern eine Leckage nachteilig für die landwirtschaftliche Produktion ist und wie lange der Boden braucht, um sich zu regenerieren.

Um einer Leckage vorzubeugen, sollten die *Komponenten der Feldhydraulik* standardmäßig mit Kunststoffmantelrohren ausgestattet sein. Zudem ist sicherzustellen, dass eingesetzte Rohrmaterialien dauerhaft beständig gegenüber landwirtschaftlichen Betriebsmitteln wie Gülle sind.

Wie sich zeigt, lassen sich Agri-Solarthermische Systeme prinzipiell umsetzen, ohne das Kernziel der Agri-PV, die Doppelnutzung mit landwirtschaftlicher Hauptnutzung, zu gefährden. Jedoch sind hierfür Anpassungen erforderlich und nicht jeder Solarthermie-Kollektor ist gleich gut dafür geeignet. Daneben sind die Aspekte Lichtmanagement für das Pflanzenwachstum und auch die Mehrkosten der Aufständigung, aufgrund des höheren Gewichts der Kollektoren, zukünftig zu berücksichtigende Aspekte, die einer genaueren Untersuchung bedürfen. Abbildung 3 gibt einen ersten Ausblick auf die zukünftigen Entwicklungen für Agri-ST-Anlagen.



Abbildung 3: Status Quo und Technologieausblick zu Agri-Solarthermie-Konzepten

Grundsätzlich ist auch eine Integration von Nutztierhaltung in Agri-ST-Konzepten denkbar; bislang ist jedoch keine entsprechende Anlage realisiert worden. Da dies nicht Gegenstand des vorliegenden Beitrags ist, wird auf diesen Aspekt nicht näher eingegangen. Eine erste Agri-Solarthermie-Anlage mit vertikaler Aufstellung befindet sich in Planung (siehe unten). Weiterhin wäre die Eignung von Vakuumröhrenkollektoren für eine solche Aufstellung grundsätzlich zu untersuchen. Für die Weiterentwicklung des Fachgebietes ist es wichtig, dass in naher Zukunft Agri-ST Systeme konkret definiert werden, analog zu den Standardisierungsprozessen der Agri-PV.

Fallbeispiel: Agri-ST mit vertikal aufgestellten Isolierglaskollektoren

Um die zuvor definierten Anforderungen greifbarer zu machen und deren praktische Relevanz zu überprüfen, wird im Folgenden ein konkretes Fallbeispiel vorgestellt: die Agri-Solarthermie mit vertikal aufgestellten Isolierglaskollektoren. Als Ausgangspunkt dient das Konzept der vertikalen Agri-PV, die eine Unterkategorie der bodennahen Agri-PV ist. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass sie den landwirtschaftlichen Betrieb nur geringfügig beeinträchtigt. Durch die vertikale Ausrichtung bleibt die Bearbeitbarkeit der Fläche nahezu vollständig erhalten. Auch die Auswirkungen auf das Mikroklima sind moderat, da keine großflächige, dauerhafte Verschattung wie bei hochaufgeständerten Anlagen entsteht. Stattdessen ermöglicht die Bauweise eine

gleichmäßigere Lichtverteilung. Häufig wird unter diesen Anlagen Dauergrünland bewirtschaftet oder der Anbau niedrig wachsender Ackerbaupflanzen realisiert (vgl. [20]). So zeigt eine Studie von Victoria et al. aus Dänemark zeigt, dass in vertikalen Agri-PV-Systemen die Windgeschwindigkeit zwischen den Modulreihen um etwa 50 % niedriger liegt als auf einem benachbarten Referenzfeld. Zudem wurden eine erhöhte relative Luftfeuchtigkeit sowie eine höhere Lufttemperatur festgestellt. Diese mikroklimatischen Veränderungen gehen mit verbesserten Wachstumsbedingungen für Pflanzen in kälteren Klimazonen einher. In der untersuchten Pilotanlage konnte eine Landnutzungseffizienz³ von 118 % für Weizen und 126 % für Gräser erzielt werden [22].

Wie bereits in Tabelle 3 erwähnt, eignen sich Isolierglaskollektoren für eine vertikale Aufstellung aufgrund der systemimmanenten Bifazialität. In Abbildung 4 ist eine solche Anlage konzeptionell dargestellt.

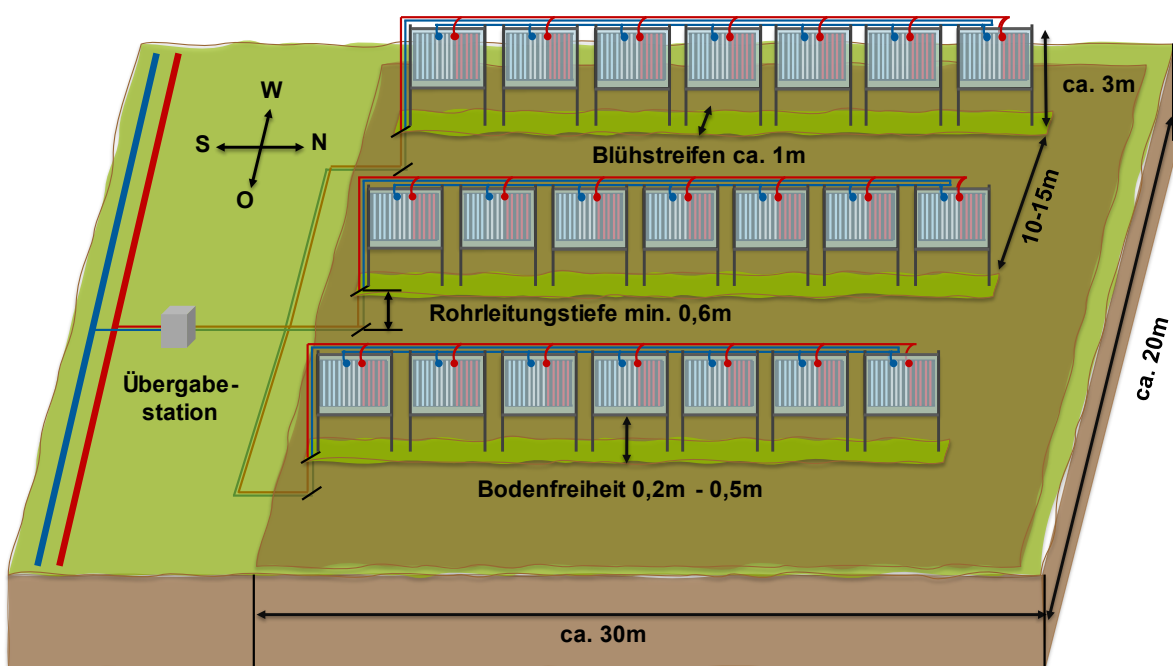


Abbildung 4: Konzeptionelle Darstellung einer vertikalen Agri-Solarthermie-Anlage

Eine Demonstrationsanlage befindet sich am *Institut für neue Energie-Systeme (InES)* der *Technischen Hochschule Ingolstadt* im Rahmen des Forschungsprojekts *STRAWBERRIES* in Planung und soll im Jahr 2026 in Betrieb gehen. Diese soll in ein bestehendes Nahwärmenetz in Bayern einspeisen und die Umsetzbarkeit dieses Konzepts demonstrieren. Erste Untersuchungen am *InES* zum energetischen Ertrag einer solchen Anlage ergaben für einen Standort in Oberfranken vergleichbare Jahreserträge wie eine 35° südausgerichtete monofaziale Referenzanlage mit Standard-Flachkollektoren. So lag der Ertrag der Isolierglasanlage bei 453 kWh/m²_{Kollektorfläche}

³ Die Landnutzungseffizienz (engl. Land Equivalent Ratio, LER) ist ein Indikator für Agri-PV-Systeme, welcher die Summe aus relativer landwirtschaftlicher Ernte und Energieertrag im Vergleich zu einer Referenzfläche mit jeweils getrennter Nutzung darstellt. Eine Landnutzungseffizienz > 1 zeigt eine höhere Flächeneffizienz in einem Agri-PV-System, als das dies bei getrennter Nutzung der Fall ist [21].

und der Ertrag der Referenzanlage bei $464 \text{ kWh/m}^2_{\text{Kollektorfläche}}$. Somit zeigte die vertikal aufgestellte Agri-ST-Anlage bei 10,1% geringerer Einstrahlung auf die Kollektoren einen nur 2,3% geringeren Ertrag. Dieser Effekt kommt durch die erhöhte Saisonalität zustande, wodurch die Kollektoren im Sommer über einen längeren Zeitraum Strahlung aufnehmen als eine konventionelle Anlage [4].

Bei der Anlagenhöhe und den Reihenabständen ist es wichtig, einen richtigen Trade-Off zwischen geringer Selbstverschattung und einer akzeptablen Maximalhöhe zu finden, um hohe Windlasten zu vermeiden. Die Unterkonstruktion soll so gestaltet sein, dass sie Belastungen der Windlastzone 4 standhält. Der Abstand zwischen den Kollektoren sollte so gering wie möglich gehalten werden, um den Verrohrungsaufwand klein zu halten. Im Montagegestell müssen die Kollektorecken mit Gummieinlagen versehen werden, um langfristig eine Beschädigung der äußeren Versiegelung der geschlossenen Isolierglaskollektoren zu vermeiden.

Für die hydraulische Anbindung der Kollektoren sollten Edelstahl- und Aluminiumbauteile verwendet werden, da der eingesetzte Roll-Bond Absorber aus Aluminium mit Kupfer bzw. Messingbauteilen reagieren könnte und systemseitige Korrosion verursachen kann. Weiterhin ist zu beachten, dass die Kollektoren und das Rohrnetz mechanisch entkoppelt sind. Dies kann durch Wellrohre sichergestellt werden. Die Verschaltung der Kollektoren kann, wie oben dargestellt, in einer Tichelmann-Schaltung erfolgen. Die Sammelleitungen von Vor- und Rücklauf laufen in einer schmalen Rohrtrasse auf der Kollektorkonstruktion entlang. Eine Fixierung der Sammelleitung mit Rohrschellen ist notwendig, um die Konstruktion vor äußeren Krafteinwirkungen besser zu schützen. Bei der Rohrtrasse ist zu beachten, dass diese nicht breiter als der Kollektor selbst ist, um eine Selbstverschattung zu vermeiden.

Der Reihenabstand ist mit dem Flächennutzer abzustimmen. Aus der Agri-PV übliche Reihenabstände sind 10-15m. Neben den Kollektorreihen sollten jeweils 0,5 m Abstand eingehalten werden. Dieser Streifen kann entweder als Blühstreifen zur Förderung der Biodiversität angelegt werden, oder aber als Grasstreifen belassen werden. Bei der Wahl des Saatguts für den Blühstreifen sollte darauf geachtet werden, eine Mischung zu wählen, die nicht in das Feld hineinwächst. Der Abstand zur Bearbeitungsfläche kann auch geringer sein, was aber nicht zu empfehlen ist, wenn eine Beschädigung der Anlage ausgeschlossen werden sein soll. Die Bodenfreiheit ist variabel, sie sollte aber nicht zu gering sein, um auch hier Schäden durch bodennahe Arbeiten zu vermeiden. Die Leitungstiefe sollte, analog zu den Anforderungen der Agri-PV, mindesten 60 cm von der Bodenoberkante zur Rohroberkante betragen.

Fazit und Ausblick

Perspektivisch sollte Flächennutzung in der Energiewende integrativ gedacht werden, um gesellschaftliche Akzeptanz und Ressourceneffizienz zu steigern. Agri-Solarthermie kann dabei eine Schlüsselrolle einnehmen: Sie ermöglicht eine nachhaltige, preisstabile und klimafreundliche Wärmeversorgung – insbesondere im ländlichen Raum. Auf Basis der Analyse der Agri-PV und der herkömmlichen Freiflächen-Solarthermie zeigt sich, dass Anforderungen und Randbedingungen beider Systeme durchaus vergleichbar und daraus qualitative Kriterien für Agri-ST-Systeme übertragbar sind. Es bestehen keine grundsätzlichen Ausschlussfaktoren,

die einer technisch-ökonomisch sinnvollen Umsetzung im Wege stehen. Adaptions- und Entwicklungsbedarf besteht dabei in mehreren Bereichen. Hier sind unter anderem die Integration in das landwirtschaftliche System, Installation und Inbetriebnahme sowie die Einsetzbarkeit von Komponenten zu nennen. Im Bereich der Kollektortechnologie bieten sich hier aufgrund ihrer Bifazialität und des geringen Anpassungsaufwands Isolierglaskollektoren als eine vielversprechende technologische Grundlage an.

Daraus ergeben sich fünf zentrale Handlungsfelder:

1. **Definition von Agri-ST-Konzepten:** Ein zentrales Handlungsfeld ist die eindeutige Definition von Agri-Solarthermie-Systemen. Dabei sollte geklärt werden, welche weiteren Kollektortechnologien sich technisch und wirtschaftlich für den Einsatz in Agri-ST-Anlagen eignen. Eine klare Abgrenzung ist essenziell, um Standardisierungsprozesse voranzutreiben und verlässliche Grundlagen für öffentliche Förderungen zu schaffen.
2. **Weiterentwicklung konkreter Anforderungen und Randbedingungen für Agri-ST-Systeme:** aufbauend auf der grundlegenden Definition von Agri-ST-Konzepten, ist es notwendig, konkrete Anforderungen und Randbedingungen weiterzuentwickeln. So sollten beispielsweise Anforderungen an die hydraulische Sicherheit sowie an die Eignung von Wärmeträgerfluiden im landwirtschaftlichen Kontext definiert werden. Dies ist insbesondere im Sinne eines sicheren und praxistauglichen Einsatzes solcher Anlagen in der Landwirtschaft von Bedeutung.
3. **Integration solarthermischer Aspekte in Agri-PV-Standards:** Die zuvor beschriebenen Schritte – die Definition geeigneter Agri-ST-Konzepte (Punkt 1) sowie die Festlegung konkreter Anforderungen und Randbedingungen (Punkt 2) – machen eine Integration in bestehende Standardisierungsprozesse notwendig. Für die Umsetzung zeichnen sich derzeit zwei Wege ab:
 - a. **Erweiterung bestehender Agri-PV-Standards:** Ein Ansatz wäre, den laufenden Standardisierungsprozess im Bereich der Agri-PV, um solarthermische Komponenten zu ergänzen und so schrittweise einen übergreifenden Standard für Agri-Solartechnik zu entwickeln.
 - b. **Entwicklung eines eigenständigen Agri-Solarthermie-Standards:** Alternativ könnte ein paralleler Prozess initiiert werden, der ausschließlich auf die Anforderungen solarthermischer Systeme im landwirtschaftlichen Kontext fokussiert ist.
4. **Forschung zu Wechselwirkungen mit der Landwirtschaft:** Im Gegensatz zur Agri-PV, bei der Mikroklima und Lichtmanagement im Fokus stehen, bedarf es bei Agri-ST gezielter Forschung zu thermischen Einflüssen auf landwirtschaftliche Flächen. Relevante Fragen betreffen etwa Wärmeverluste in den Boden, mögliche Auswirkungen auf das Pflanzenwachstum oder die Nutzung solarer Wärme für landwirtschaftliche Prozesse. Potenzielle weitere Anwendungen reichen von Trocknungsprozessen bis hin zu feldintegrierten Heizsystemen oder der Regeneration von Erdwärmequellen.
5. **Entwicklung eines Förderinstruments für Agri-Solarthermie:** Parallel zur inhaltlichen Weiterentwicklung sollte perspektivisch auch ein angepasstes

Förderinstrument für Agri-ST entwickelt werden, analog zur Förderung von Agri-PV-Anlagen. Eine gezielte staatliche Unterstützung könnte den Markteinstieg beschleunigen und die duale Landnutzung attraktiv machen.

Für eine erfolgreiche Weiterentwicklung der Agri-Solarthermie-Technologie sind darüber hinaus wissenschaftlich begleitete Demonstrationsvorhaben erforderlich, die sowohl technische Machbarkeit, technologische und organisatorische Herausforderungen als auch landwirtschaftliche Synergien in der Anwendung aufzeigen.

Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) der Bundesrepublik Deutschland im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms unter dem Projekt "STRAWBERRIES" (Projekt-ID 03EN6041A) gefördert. Wir danken dem BMWK und dem Projektträger Jülich für die Unterstützung des Forschungsvorhabens sowie für die vertrauensvolle Zusammenarbeit.

This project has been funded by partners of the CETPartnership (<https://cetpartnership.eu/>) through the Joint Call 2022. As such, this project has received funding from the European Union's Horizon Europe research and innovation programme under grant agreement no. 101069750."

Literaturangaben

- [1] Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem: Bundesländer im Transformationsprozess, Thelen, C., Nolte, H., Kaiser, M., Jürgens, P., Müller, P., Senkpiel, C. u. Kost, C., Freiburg im Breisgau 2024
- [2] Epp, B.: National Day shines light on future potential and market realities, 2024. <https://solarthermalworld.org/news/national-day-shines-light-on-future-potential-and-market-realities/>, abgerufen am: 20.11.2024
- [3] 12 Leitplanken für die nächste Legislatur. Energiewende und Klimaschutz langfristig denken und konsequent umsetzen, Impulspapier, Deutsche Energie-Agentur GmbH, 2025
- [4] Summ, T., Trinkl, C. u. Zörner, W.: Agri-Solarthermie-Systeme: Effiziente Kombination von Freiflächen-Solarthermie und landwirtschaftlicher Nutzung durch bifaziale Flachkollektoren. 34. Symposium Solarthermie und innovative Wärmesysteme - 14. - 16. Mai 2024 im Kloster Banz, Bad Staffelstein. 2024, S. 118–129
- [5] Vornorm DIN SPEC 91434:2021. *Agri-Photovoltaik-Anlagen – Anforderungen an die landwirtschaftliche Hauptnutzung*
- [6] Planungs- und Genehmigungsleitfaden für Freiflächen-Solarthermie. in Baden-Württemberg, HIR Hamburg Institut Research gGmbH, 2016
- [7] Solar District Heating Trends and Possibilities. Characteristics of Ground-Mounted Systems for Screening of Land Use Requirements and Feasibility, Technical Report of IEA SHC Task 52, Subtask B - Methodologies, Tools and Case Studies for Urban Energy Concepts, Trier, D., Skov, C. K., Sørensen, S. S. u. Bava, F., Kopenhagen 2018

- [8] Land for Renewables. Briefing on spatial requirements for a sustainable energy transition in Europe, Perera, M. u. Tansini, C., Brüssel 2024
- [9] Deutscher Bundestag: § 35 BauGB - Einzelnorm. 2024
- [10] Flächen einfach mehrfach nutzen: Wie Multicodierung zur Lösung der Solarthermie-Flächenkonflikte beiträgt, Infoblatt Solare Wärmenetze | Nr. 9, Sandrock, M. u. Möhring, P., Hamburg 2020
- [11] Handbuch - Genehmigung von Freiflächen Solarthermieranlagen, Landsberg, F. u. Greenberg, M., Hamburg 2024
- [12] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Flächenverbrauch – Worum geht es?, 2024. <https://www.bmuv.de/themen/nachhaltigkeit/strategie-und-umsetzung/reduzierung-des-flaechenverbrauchs>, abgerufen am: 31.03.2025
- [13] TFZ-Leitfaden - Agri-Photovoltaik. Planung und Genehmigung, Fritz, M., Stöppler, M. u. Grieb, M., Straubing 2023
- [14] Agri-Photovoltaik: Chance für Landwirtschaft und Energiewende. Ein Leitfaden für Deutschland | Stand Februar 2024, Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg 2024
- [15] Vorlage zur Ausschreibung von Freiflächen - Solarthermieranlagen zur Einbindung in Wärmenetze in Kombination mit der Abgabe solarer Ertragsgarantien, AGFW | Der Energieeffizienzverband für Wärme, Kälte und KWK e. V., Frankfurt am Main 2020
- [16] Klyk, C. u. Schindele, S.: Agrivoltaics. Technical, Ecological, Commercial and Legal Aspects. Energy engineering. Stevenage: Institution of Engineering and Technology 2024
- [17] SPF Testing Institut für Solartechnik SPF: Solar Collector Factsheet. Savosolar SF500-15 SG-M, Rapperswill 2018. <https://spftesting.info/uploads/files/collectors/scf1786de.pdf>
- [18] energie-experten.org: Solarmodul Gewicht: Wie viel wiegt ein Solarmodul?, Hamburg 2024. <https://www.energie-experten.org/erneuerbare-energien/photovoltaik/solarmodule/gewicht>, abgerufen am: 25.03.2025
- [19] Ritter Solartechnik GmbH & Co. KG: Vakuumröhrenkollektoren | Baureihe XL P. Datenblatt, Dettenhausen 2020
- [20] Lahr, S.: Landwirtschaftliches Ertragsverhalten in vertikalen bifazialen Agri-PV-Systemen. Agri-PV Forum Sachsen 2023. Dresden 2023
- [21] Dual Land Use for Agriculture and Solar Power Production: Overview and Performance of Agrivoltaic Systems, Trommsdorff, M., Campana, P. E., Macknick, J., Fernández Solas, A., Gorjian, S. u. Tsanakas, I., 2025
- [22] Vertical Agrivoltaics in a Temperate Climate: Exploring Technical, Agricultural, Meteorological, and Social Dimensions, Preprint, Victoria, M., Pullens, J., Torma, G., Lindhardt, M., Niazi, K., Jahangirlou, M., Khoury, Y. E., Aschemann-Witzel, J., Ottosen, C.-O. u. Jørgensen, U., 2024