Agrophotovoltaik – Ressourceneffiziente Landnutzung zur Entschärfung des Flächennutzungskonflikts zwischen Energie- und Landwirtschaft

Georg Bopp, Adolf Goetzberger, Tabea Obergfell, Christian Reise, Stephan Schindele

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme
Heidenhofstr. 5, 79110 Freiburg
Tel.: +49 (0) 761 4588 5026, Fax: +49 (0) 761 4588 9026
E-Mail: tabea.obergfell@ise.fraunhofer.de
Internet: www.ise.fraunhofer.de

1. Einleitung

In den beiden letzten Dekaden haben viele Staaten politische Strategien zur Förderung erneuerbarer Energien etabliert, um Klimaänderungen einzudämmen. Dadurch kam es zu einem bedeutenden Wachstum des globalen PV-Markts. Aufgrund der geringeren spezifischen Investitionskosten ist Strom aus Freiflächenanlagen preiswerter als aus Dachanlagen. Der heute schon beachtliche Marktanteil von Freiflächenanlagen nimmt deshalb weltweit weiter zu [1, 2][1]. Diese Entwicklung verstärkt Landnutzungskonflikte zwischen Energie- und Landwirtschaft.

Mit zunehmendem Einsatz erneuerbarer Energien wächst das Bewusstsein für den Konflikt zwischen Energie- und Nahrungssektor, wobei die meisten Studien nach wie vor auf den Konflikt, der aus der Bioenergiegewinnung resultiert, fokussieren. Über den Konflikt zwischen PV und Landwirtschaft gibt es kaum Studien. Mit Verweis auf diesen Konflikt schloss die EEG Novelle des Jahres 2010 eine Vergütung für PV-Strom von landwirtschaftlichen Nutzflächen aus und beschränkte Freiflächenanlagen auf Konversionsflächen und Flächenstreifen entlang von Verkehrswegen.

In der vorliegenden Publikation stellen wir die Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie über die innovative PV-Systemtechnologie Agrophotovoltaik (APV) vor, die es ermöglicht, Flächen gleichzeitig sowohl zur Nahrungsmittelproduktion als auch zur Stromgewinnung zu nutzen – und die bereits vor vielen Jahren vorgeschlagen wurde [3]. APV ermöglicht eine Entschärfung des dargestellten Landnutzungskonflikts und ermöglicht eine Einkommensdiversifizierung im landwirtschaftlichen Sektor. Zugleich

[1] Je nach Land entwickelt sich der Marktanteil von PV-Freiflächenanlagen sehr unterschiedlich. In der EU ist der Trend negativ und PV-Dachanlagen nehmen zu, während in anderen Regionen der Erde, v.a. in den USA und Südost-Asien, Freiflächenanlagen die höchsten Wachstumsraten aller PV-Segmente vorweisen.

bietet APV denjenigen Kulturen Schutz vor Strahlungsstress, die unter der im Zuge des Klimawandels in Deutschland zunehmenden Sonneneinstrahlung leiden [4].

2. Analyse des Pflanzenwachstums unter bestehenden PV-Anlagen

Im Rahmen der Machbarkeitsstudie wurde das Pflanzenwachstum unter bestehenden PV-Anlagen analysiert. Dazu wurden Vegetationskartierungen unter drei Anlagen, die sich hinsichtlich Ausrichtung und Installationshöhe der Module unterschieden, durchgeführt. Die wesentlichen Ergebnisse dieser Untersuchungen waren:

- Das üppige Pflanzenwachstum unter und zwischen den Modulreihen legt nahe, dass auch landwirtschaftliche Nutzpflanzen unter ähnlichen Bedingungen wachsen können.
- Direkt unter den Modulen ist die Lichtverfügbarkeit zwar reduziert, dennoch gibt es zahlreiche schattentolerante Pflanzenarten, die unter diesen Bedingungen gedeihen.
- Wasser ist in allen Bereichen verfügbar, wobei die Verteilung variiert: Im Bereich unter den Modulen ist die Feuchtigkeit am höchsten, da dort die Verdunstung durch die Beschattung minimal ist.
- Die Verteilung von Licht und Feuchtigkeit wird mit zunehmender Installationshöhe der Module gleichmäßiger.

Abhängig von der Modulausrichtung und deren Abstand zum Boden konnten mehrere Zonen identifiziert werden, die sich hinsichtlich der Artenzusammensetzung unterscheiden. Aus den Unterschieden im Unterwuchs ließen sich Rückschlüsse auf graduelle Unterschiede in den für das Pflanzenwachstum wichtigsten Umweltfaktoren Licht und Feuchtigkeit ziehen. Die Vegetation in Zone 1 direkt unter den Modulen wies auf niedrige Einstrahlungsverhältnisse und eine durch die niedrige Evapotranspiration ausreichende Wasserversorgung[2] hin. Ein Optimum zwischen Lichtverfügbarkeit und Wasserverfügbarkeit wurde in Zone 2 festgestellt, während den Pflanzen in Zone 3 zwar noch mehr Licht zur Verfügung stand, gleichzeitig aber aufgrund höherer Verdunstung die Bodenfeuchte limitierend für das Wachstum war. In Abbildung 1 ist beispielhaft eine dreistufige Zonierung im Pflanzenwuchs dargestellt.

[2] Unterschiede in der Wasserverteilung sind bei der hier dargestellten Anlage besonders ausgeprägt, da die Anlage auf einem Flachdach installiert ist und die Bodenschicht relativ dünn ist. Bei mächtigeren Bodenschichten sind weniger Unterschiede zu erkennen, da mehr Wasser gespeichert werden kann.

Abbildung 1 Gliederung der Vegetation unter einer bestehenden, bodennah installierten PV-Anlage in drei Zonen.

3. Auswahl geeigneter Ackerkulturen für Deutschland

Die meisten kommerziellen Feldfrüchte der gemäßigten Breiten sind bislang nicht auf Schattentoleranz untersucht worden [5], weshalb eine Empfehlung geeigneter Arten für APV schwierig ist. Kulturarten mit hohem Strahlungsbedarf (allen voran C4-Pflanzen wie beispielsweise Mais und Hirse) sind generell für Standorte in Deutschland keine gute Wahl, da durch die Beschattung starke Ertragsreduktionen zu erwarten sind. Trotz spärlicher Informationen lassen sich Nutzpflanzen grob in drei Kategorien hinsichtlich ihrer Eignung für APV unterteilen:

+	positive Effekte überwiegen:	Mehrertrag
0	keine signifikanten Auswirkungen:	gleichbleibender Ertrag
-	negative Effekte dominieren:	Ertragseinbußen

Die Klassifikation der Feldfrüchte beruht auf Ergebnissen experimenteller Beschattungsversuchen oder Monitoringergebnissen aus Agroforstsystemen. Diese Informationen standen allerdings nur für wenige Arten zur Verfügung, weshalb Informationen über artspezifische Ansprüche an Standort und Klima analysiert und als Grundlage für die Klassifizierung verwendet wurden. Diese Einteilung soll als erste Abschätzung verstanden werden, welche Nutzpflanzen für eine APV-Anwendung geeignet sein können, und bedarf einer experimentellen Überprüfung in einem optimierten APV-System. In Tabelle 1 ist beispielhaft ein Auszug der untersuchten und klassifizierten Feldfrüchte dargestellt.
Trotz der spärlichen Datenlage kann festgehalten werden, dass einige Ackerkulturen unter moderater Beschattung besser gedeihen als bei voller Einstrahlung und zahlreiche Arten nur unerheblich durch Schatten in ihrer Ertragsbildung beeinflusst werden. Daraus lässt sich schließen, dass in Deutschland ein großes Potenzial für APV Anwendungen existiert, auf das im Abschnitt 0 des vorliegenden Papers eingegangen wird.

Tabelle 1 Beispiele für Feldfrüchte der verschiedenen Ertragskategorien.

Kategorie		
–	**0**	**+**
Mais	Raps	Kartoffeln
Weizen	Roggen	Salate (alle Sorten)
Obstkulturen	Hafer	Spinat
Sonnenblumen	Spargel	Ackerbohnen

4. Simulation der Einstrahlung unter verschieden angeordneten PV-Modulen

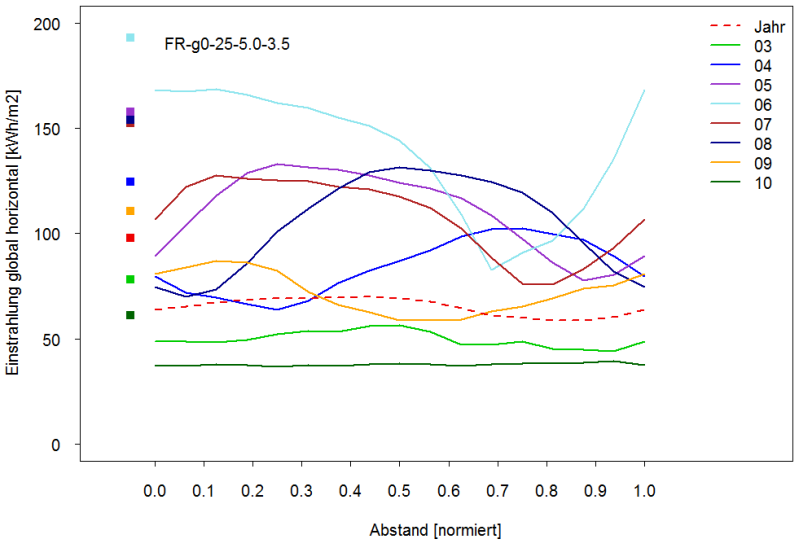
Als theoretisches Fundament für zukünftige Pilotprojekte wurde ein Simulationstool basierend auf der Strahlverfolgungssoftware *Radiance* [6] entwickelt, das die Berechnung der Einstrahlung auf Bodenhöhe in einem APV-System ermöglicht. In diesem Tool sind diverse Parameter, wie die Ausrichtung und Neigung der Module, Reihenabstände und Installationshöhe, variierbar.

Die Simulationen wurden für den Standort Freiburg im Breisgau, Deutschland, durchgeführt. Es wurde ein 100 x 100 m^2 Modulfeld bestehend aus 1 Meter breiten Standardmodulen simuliert. Der Abstand zwischen den einzelnen Reihen wurde zwischen 2,5 m und 7,5 m variiert, die Höhe der Modulunterkante über dem Boden zwischen 2 m und 7 m. Modulneigung wurde zwischen 25° und 45° variiert. Meteorologische Eingangsdaten für *Radiance* sind halbstündige Werte der Direkt- und Diffusstrahlung zwischen Sonnenaufgang und -untergang aus dem Jahr 2000, insgesamt also rund 8900 Zeitschritte. Für jeden Zeitschritt wurde die Einstrahlung in kWh/m^2 in einer Höhe von 10 cm über der Erdoberfläche entlang eines Transekts orthogonal zu den Modulreihen berechnet. Der Transekt deckt die Strecke zwischen den Unterkanten zweier Modulreihen mitten im Modulfeld ab. Dadurch konnte sichergestellt werden, dass Randeffekte (z.B. durch seitlichen Einfall von Licht) ausgeschlossen sind.

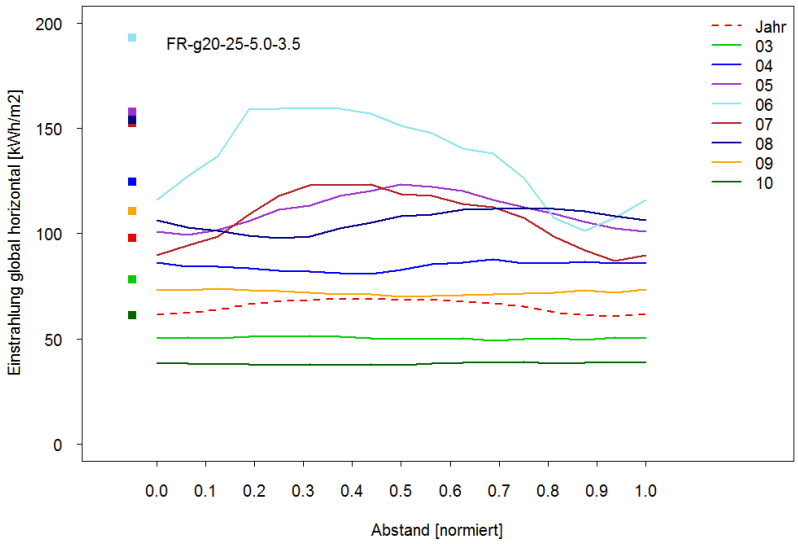
Abbildung 3 zeigt die Strahlungsverteilung für unterschiedlich orientierte Module mit einem Neigungswinkel von 25°. Auf der x-Achse ist der normierte Abstand zwischen zwei Modulreihen aufgetragen, links beginnend bei der Unterkante einer Modulreihe bis zur Unterkante der dahinter stehenden Reihe (rechter Rand). Auf der y-Achse sind die monatlichen Summen der Globalstrahlung am Boden aufgetragen. Die Kurven decken die für das Pflanzenwachstum relevanten Monate inklusive des jährlichen Durchschnitts ab. Die farbigen Quadrate auf der linken Seite stellen die Monatssummen der Globalstrahlung auf einer unbeschatteten Fläche dar.

Bei den nach Süden ausgerichteten Modulen ist eine deutliche Senke in der Einstrahlung hinter der Modulreihe erkennbar. Diese Abnahme der Einstrahlung ist besonders in den Sommermonaten stark ausgeprägt. Die Form des Schattenwurfs ist unempfindlich gegenüber Installationshöhe der Module und dem Reihenabstand. Verändert man jedoch die Orientierung, wird die Strahlungsverteilung mit zunehmender Abweichung von Süden gleichmäßiger (vgl. Abbildung 3 a-d). Der Schattenwurf hängt also primär von den Sonnenumlaufbahnen relativ zum Verlauf der Modulreihen ab: Ist sie annähernd parallel zu den Modulreihen – was der Fall ist bei nach Süden ausgerichteten Modulen – ergibt sich eine sehr heterogene Strahlungsverteilung. Mit zunehmender Abweichung wird die Strahlungsverteilung homogener.

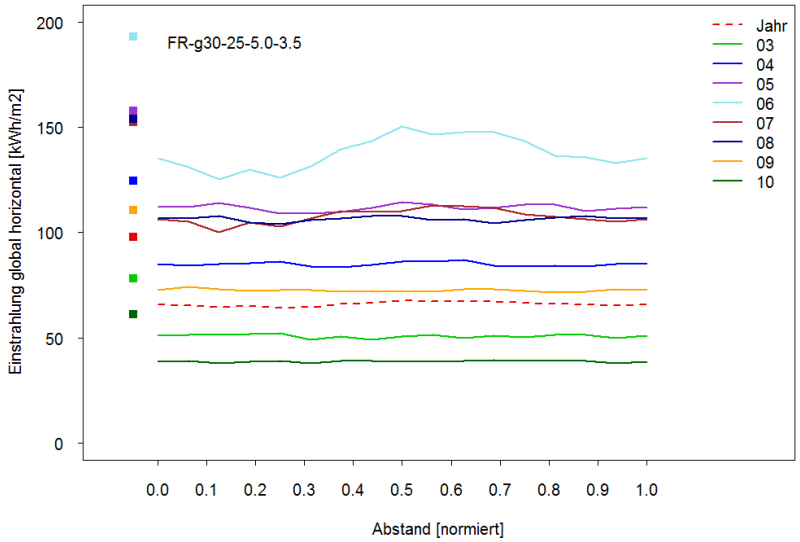
Aus landwirtschaftlicher Perspektive ist eine möglichst gleichmäßige Strahlungsverteilung in einem APV-System anzustreben, da ein heterogenes Mikroklima Schwankungen in Ertragsqualität und -quantität sowie unterschiedliche Reifezeiten zur Folge hat. Vor allem in der Hauptwachstumszeit der meisten Kulturen, dem Sommer, ist ein gleichmäßiges Strahlungsregime unabdingbar.



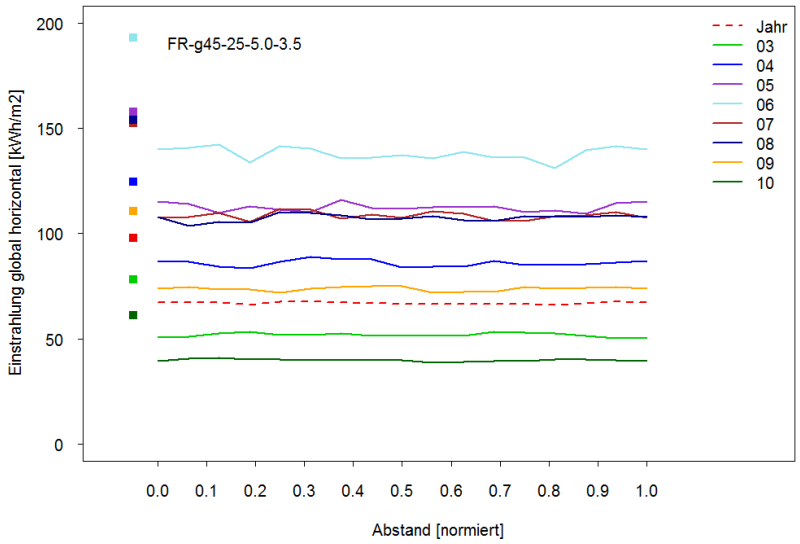
(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 2 Monatssummen (März bis Oktober sowie Jahresmittel) der horizontalen Globalstrahlung (kWh/m2) zwischen zwei Modulreihen am Standort Freiburg (FR). Modulneigung 25°, Installationshöhe 5,0 m, Reihenabstand 3,5 m. Die Orientierung der Module variiert zwischen Süden (0°, (a)), 20° (b), 30° (c) und 45° (d) nach Westen.

Deshalb schließen wir aus den Strahlungssimulationen, dass abweichend von der klassischen Modulausrichtung nach Süden ein APV-System nicht direkt nach Süden, sondern um 30°bis 45° abweichend orientiert werden sollte. Die dadurch bedingten Ertragseinbußen auf elektrischer Seite sind mit maximal 5% unerheblich.

5. Einfluss von Beschattung auf landwirtschaftliche Erträge

Die Erträge der Ackerkulturen abhängig von der verfügbaren Einstrahlung wurden auf Basis von Literaturdaten abgeschätzt. In Abbildung sind für die drei oben definierten Pflanzenkategorien die relativen Biomasseerträge in Abhängigkeit von der Photosynthetisch Aktiven Strahlung (PAR), die näherungsweise dem für das menschliche Auge sichtbaren Lichtspektrum entspricht, dargestellt.

Die Abbildung veranschaulicht, dass für Pflanzen der Kategorie „+“ mäßige Beschattung von Vorteil ist und der Ertrag bis ca. 50% PAR zunimmt. Erst bei noch mehr Schatten sinkt der Ertrag unter das Referenzniveau. Der Ertrag von Kulturen der Kategorie „0“ bleibt bis ca. 70% PAR unbeeinflusst, erst bei noch mehr Schatten nimmt der Ertrag ab. Bei Kategorie „–“ führt schon eine geringfügige Beschattung zu Ertragseinbußen, die nahezu linear abnimmt.

Die Ertragskurven der drei Kategorien wurden anschließend mit den Ergebnissen aus den Strahlungssimulationen für verschiedene Reihenabstände der PV-Module kombiniert. Daraus ließ sich ein für das Pflanzenwachstum optimaler Reihenabstand für ein APV-System bestimmen, der bei einer für Deutschland typischen Fruchtfolge bei 3,5 m liegt.

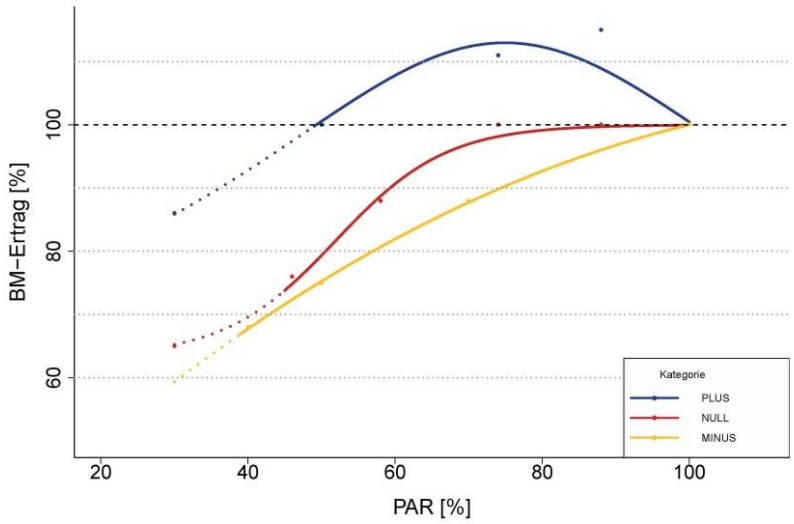


Abbildung 3 Relativer Biomasseertrag der drei Pflanzenkategorien in Abhängigkeit von der Photosynthetisch Aktiven Straghlung (PAR), die proportional zur Globalstrahlung ist.

6. Technisches Potenzial in Deutschland

Bei der Bewertung des Potenzials einer neuen Technologie werden prinzipiell vier Dimensionen unterschieden: theoretisches, technisches, wirtschaftliches und erschließbares Potenzial (vgl. [7]). Für APV wurden theoretisches, technisches und erschließbares Potenzial ermittelt. Das theoretische Potenzial ergibt sich aus der

maximal zur Verfügung stehenden Fläche ohne jegliche Eingrenzung. Für APV umfasst das die gesamte landwirtschaftlich genutzte Fläche Deutschlands. Aus technischen Gesichtspunkten ist es jedoch nicht möglich, die gesamte Fläche zu nutzen: Es werden nur Flächen in Betracht gezogen, auf denen Pflanzen der Kategorien „+“ und „0“ (von dieser Kategorie nur Sommerkulturen) kultiviert werden. Das erschließbare Potenzial berücksichtigt weitere Einschränkungen, wie beispielsweise Neigung und Ausrichtung der Flächen oder rechtliche und administrative Restriktionen. Das erschließbare Potenzial wurde grob auf 10% des technischen Potenzials geschätzt.

Der Potenzialabschätzung liegt eine Anlagengeometrie mit 3,5 m Reihenabstand zu Grunde. Damit beträgt die installierte Leistung pro Hektar 430 kW_p. In Tabelle 2 ist das Ergebnis der Potenzialabschätzung dargestellt.

Tabelle 2 Abschätzung der APV Potenziale für Deutschland

Potenzial	Grenzen	Installierte Leistung* [kW_p/ha]	Fläche [Mio ha]	Potenzial [GW_p]
theoretisches	gesamte Landwirtschaftliche Fläche	430	13,45	5784
technisches	Ackerkulturen der Kategorien + und 0	430	1,24	533
erschließbares	10% des technischen Potenzials	430	0,12	53

*Angenommener Wirkungsgrad der Module: 14,3%.

In Anbetracht der Tatsache, dass die Zielvorgabe der Bundesregierung bei 52 GW_p installierter PV-Leistung bis zum Jahr 2020 liegt, ist das erschließbare Potential von APV beträchtlich und könnte den angestrebten Beitrag von PV an der Energieversorgung verdoppeln. Sehr wahrscheinlich wird mit den 52 GW_p nicht das Limit an installierter PV-Leistung erreicht werden: Andere Schätzungen gehen von einem weit höheren Bedarf an PV um 200 GW_p aus [8].

Der Fokus des vorliegenden Artikels war auf die Untersuchung einer APV-Anwendung in Deutschland gerichtet. Wahrscheinlich wird APV jedoch in anderen Teilen der Erde von viel größerer Bedeutung sein. Dabei ist der Energieverbrauch im landwirtschaftlichen Sektor sehr hoch: Weltweit wird in der Landwirtschaft 30% der Energie verbraucht [9]. Gleichzeitig haben in Entwicklungsländern große Teile der Landbevölkerung keinen Zugang zu bezahlbarer Energie. Außerdem werden in diesen Regionen häufig wertvolle Trinkwasserressourcen für die Bewässerung von landwirtschaftlichen Kulturen verwendet, obwohl diese ohnehin limitiert sind. APV

kann besonders in diesen Regionen ein Lösungsansatz sein, da gleichzeitig Energie bereitgestellt und der Bewässerungsbedarf reduziert werden kann.

In ariden und semiariden Regionen leiden Ackerkulturen oftmals unter zu starker Sonneneinstrahlung, Hitze und Transpiration und würden von partieller Beschattung profitieren. Auch Arten, die normalerweise aufgrund des trockenheißen Klimas dort nicht wachsen würden, könnten in einem APV-System kultiviert werden. Die elektrische Energie steht neben der Entsalzung und Bewässerung für weitere Anwendungen zur Verfügung. Dadurch wird die Bevölkerung unabhängiger von fossilen Rohstoffen – meist kommen in diesen Regionen Dieselgeneratoren zum Einsatz. Oder der Zugang zu Energie in abgelegenen Regionen wird durch APV erst ermöglicht. Wirtschaftlich rentabel ist die Energie aus APV, wenn Strom zu seinem wahren Preis verkauft und nicht subventioniert wird, wie es in vielen Ländern der Fall ist.

7. Fazit und Ausblick

Die vorliegende Publikation untersuchte die gleichzeitige Produktion von Lebensmitteln und Elektrizität auf ein und derselben Fläche mit der Systemtechnologie Agrophotovoltaik. Ergebnis der Studie ist, dass APV ein vielversprechender Ansatz ist, um den Nutzungskonflikt zwischen Energie- und Landwirtschaft, der bereits in der Vergangenheit sichtbar geworden war und der sich mit Erreichen der echten Netzparität mit Großhandelspreisen wieder verstärken wird, zu entschärfen. Das technische Potenzial für APV in Deutschland ist mit ca. 50 GWp beträchtlich. Noch größerer Nutzen – vor allem auch auf Seite des Pflanzenbaus – ist jedoch in den Klimazonen zu erwarten, wo Ackerkulturen unter zu starker Sonneneinstrahlung leiden, der Bewässerungsbedarf hoch ist und elektrische Energie nicht flächendeckend verfügbar ist.

Noch gibt es allerdings zahlreiche offene Fragen, die in einem Pilotprojekt erforscht werden müssen. Deshalb sind die angestrebten nächsten Schritte die Installation einer APV-Demonstrationsanlage auf einem landwirtschaftlichen Betrieb sowie einer APV-Forschungsanlage auf Flächen der Universität Hohenheim zur Untersuchung der Praxistauglichkeit der Systemtechnologie, zur Analyse der Auswirkungen auf landwirtschaftliche Kulturen und zur Validierung der theoretischen Ergebnisse.

Quellen

[1] REN21, „Renewables Global Status Report," 2012. [Online]. Available: http://www.ren21.net/REN21Activities/GlobalStatusReport.aspx .

[2] European Photovoltaic Industry Association, „Global Market Outlook for Photovoltaics 2013-2017," 2013. [Online]. Available: http://www.epia.org/news/publications/.

[3] A. Goetzberger und A. Zastrow, „On the coexistence of solar-energy conversion and plant cultivation"," *International Journal of Solar Energy,* pp. 55-69, 1982.

[4] Intergovernmental Panel on Climate Change, „Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment," 2007. [Online]. Available: http://www:ipcc:ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch12:html.

[5] C. Dupraz, H. Marrou, G. Talbot, L. Dufour, A. Nogier und Y. Ferard, „Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use," *Renewable Energy,* pp. 2725-2732, 36 2011.

[6] Radiance, *Radiance - Synthetic Imaging System,* http://radsite.lbl.gov/radiance/: abgerufen am: 03.01.2014.

[7] M. Kaltschmitt, W. Streicher und A. Wiese, Erneuerbare Energien: Systemtechnik, Wirtschaftlichkeit, Umweltaspekte, Berlin: Springer, 2006.

[8] V. Quaschning und J. Weniger, „Der unterschätzte Markt," *BWK,* Bd. 64, Nr. 7/8, pp. 25-27, 2012.

[9] Food and Agriculture Organization of the United Nations, „The Case for Energy-Smart Food Systems," 2011. [Online]. Available: http://www.fao.org/docrep/014/i2456e/i2456e00.pdf.