Integrierte Photovoltaik – Aktive Flächen für die Energiewende

1. Was bedeutet PV-Integration?

Die meisten Energiesystemszenarien gehen davon aus, dass die Photovoltaik (PV) neben der Windkraft die wichtigste Säule der zukünftigen Energieversorgung in Deutschland und weltweit sein wird. Nötig für eine erfolgreiche Energiewende in Deutschland sind, abhängig von zahlreichen Randbedingungen, bis zu 310 Gigawatt installierte PV-Leistung [1]. Die heute installierte Leistung von knapp 49 GW muss somit vervielfacht werden. Neben der Herausforderung der Aufnahme von entsprechenden volatilen Strommengen in das Energiesystem benötigt der massive Ausbau der Photovoltaik erhebliche Flächen.
Mit der Integration von PV-Technologie in die Hüllen von Gebäuden, Fahrzeugen und Verkehrswegen, der Kombination mit Ackerbau und der Nutzung von Wasserflächen werden riesige, bereits für andere Zwecke genutzte Flächen für die Solarstromerzeugung erschlossen (Abbildung 1). Integrierte Photovoltaiktechnologie löst nicht nur Flächennutzungskonflikte, sie schafft an vielen Stellen auch Synergieeffekte.

Abbildung 1: Integrierte PV erzeugt Strom auf Gebäudefassaden und -dächern, auf Fahrzeugen, in Lärmschutzwänden und Straßenbelägen, über Feldern und auf künstlichen Seen.

Gebäude, Lärmschutzwände und Fahrzeuge ermöglichen eine Montage auf vorhandene Unterkonstruktionen. Im Gegensatz zu einer Aufständerung in der Freifläche wird kaum weiteres Material für die Modulmontage benötigt. Weiterhin dient die frontseitige Abdeckung der Module, häufig eine Glasscheibe, gleichzeitig als Schutz für das Gebäude, das Fahrzeug, die Nutzpflanzen oder die lärmgeplagten Anwohner. Kosten für die Flächenbereitstellung entfallen weitgehend oder vollständig.
Agro-Photovoltaik kombiniert die Erzeugung von Solarstrom und landwirtschaftlichen Produkten auf derselben Fläche. Die Ernte auf zwei Ebenen kann nicht nur die Landnutzungsrate beträchtlich erhöhen, im Projekt APV-RESOLA um bis zu 86% [2]. Abhängig von Kultur und Klima kann sich die partielle Verschattung auch vorteilhaft auf den landwirtschaftlichen Ertrag und die Bodenfeuchtigkeit auswirken.

Strom wird mit integrierter PV dezentral und häufig verbrauchsnah produziert. PV an Bord von strombetriebenen Fahrzeugen erhöht deren Reichweite und senkt ihre Betriebskosten. Der Reichweitengewinn kann bei PKW bis ca. 3300 km, bei LKW bis ca. 5000 km pro Jahr betragen, im Fall einer zusätzlichen Belegung seitlicher Flächen sind noch höhere Werte zu erzielen.
All diese Synergieeffekte reduzieren den Materialverbrauch, verbessern die Ökobilanz der Photovoltaik und erzeugen Kostenvorteile, die bei drastisch gesunkenen Preisen für Solarzellen immer stärker ins Gewicht fallen. Integrierte PV verbessert auch die CO_2-Bilanz der angeschlossenen Verbraucher, weil PV-Strom mit ca. 68 g CO_2/kWh [3] einen deutlich geringeren Emissionsfaktor aufweist als der deutsche Strommix mit 523 g CO_2/kWh [4] im Betrachtungsjahr 2016. Nach bisherigen Erfahrungen erhöht Integration auch die Akzeptanz für den weiter notwendigen, massiven PV-Ausbau.
Integrierte Photovoltaik erfordert ein hohes Maß an individuellen Lösungen. Produkte mit einheitlicher Größe und standardisiertem Design können in vielen Fällen nicht verwendet werden. Besonders im Gebäudesektor zählen kurze Lieferwege und ein geschmeidiges Zusammenspiel von Planung, Produktion und Montage. In einer kundenindividuellen Massenproduktion (engl. Mass Customization) entstehen Chancen für eine lokale, digital vernetzte PV-Produktion mit nachhaltiger Wertschöpfung deutscher und europäischer Unternehmen.

2. Flächenpotenziale für die Integration

Für die Integration von PV kommen sehr viele Flächen der bebauten Umwelt in Betracht, die der Sonne ausgesetzt sind. Abbildung 2 zeigt Schätzwerte zu technischen Potenzialen für die Integration von PV in Deutschland. Während das theoretische Potenzial eine komplette Inanspruchnahme der entsprechenden Ressourcen betrachtet, beschränkt sich das technische Potenzial auf solche Anwendungen, die technisch plausibel verwertbar sind. Allein die Bauwerkintegrierte Photovoltaik (BIPV) [5] und die Agrophotovoltaik (APV) eröffnen Flächenpotenziale für eine Nennleistung von jeweils mehr als 1 Terawatt (TW). Auf etwa 17% der landwirtschaftlich genutzten Fläche in Deutschland werden Kulturen angebaut, die partielle Verschattung tolerieren oder sogar davon profitieren.

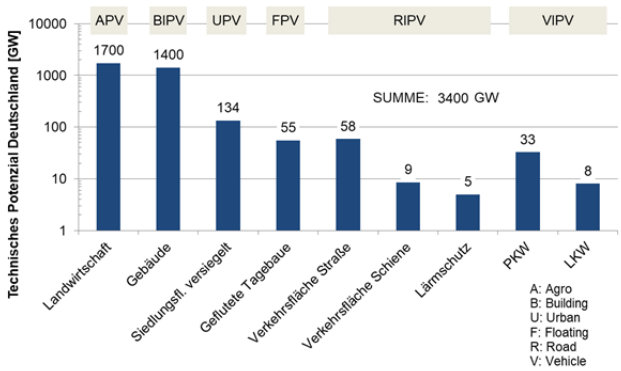

Abbildung 2: Technische Ausbaupotenziale der Integrierten Photovoltaik, geschätzt

Abbildung 3: Doppelte Ernte durch Agrophotovoltaik, Hofgemeinschaft Heggelbach (Fraunhofer ISE)

Die für die Umsetzung relevanten wirtschaftlich-praktischen Potenziale ergeben sich aus den technischen Potenzialen unter zusätzlicher Berücksichtigung ökonomischer, regulatorischer und praktischer Randbedingungen sowie von Fragen der Akzeptanz. Es ist Aufgabe der For-

schung und Entwicklung, einen möglichst großen Anteil des technischen Potenzials durch effiziente, preiswerte, langlebige und ansprechende Produktinnovationen auszuschöpfen.

3. Innovative Technologien

In allen integrierten Anwendungen senkt Effizienz die Stromgestehungskosten, weil bei annähernd gleichem Materialeinsatz und Installationsaufwand höhere Energieerträge erzielt werden. Besonders für die PV-Stromproduktion an Bord von Fahrzeugen steht sehr wenig Fläche zur Verfügung. Mehrere Institute des FVEE entwickeln höchsteffiziente Zell- und Modularchitekturen auf Basis von PERC-Technologie (Passivated Emitter and Rear Cell), HJT (Heterojunction Technology) und passivierter Rückseitenkontakte. Intensiv geforscht wird auch an Tandem- und Mehrfachsolarzellen, die das Licht in gestapelten aktiven Schichten noch effizienter nutzen [6], [7]. Als Tandem-Zellen werden insbesondere Kombinationen von Silicium-Solarzellen mit aufliegenden Perowskit- und III-V-Solarzellen untersucht. Bifaziale Technologien, die Einstrahlung von beiden Seiten des Moduls nutzen, können über landwirtschaftlichen Flächen oder in beliebig orientierten Lärmschutzwänden um 5-15% höhere Erträge liefern [8].
Neuartige, spektral hochselektive Farbschichten schaffen Potenziale für Multifunktionalität. Das Vorbild für selektive Reflexion kommt aus der Natur: die Interferenzfarben der Morpho-Schmetterlinge zeigen dem Beobachter einen brillanten Farbeindruck, unabhängig von der Beobachtungsrichtung. Die neuen Morpho-Color-Schichten auf Glas verbergen die Schaltkreise der Module und reduzieren dabei den Stromertrag der dahinterliegenden Solarzellen nur geringfügig um ca. 7% relativ [9].
Selektive Transmission lässt sich mit speziellen Dünnschicht-Solarzellen erreichen, bspw. auf organischer Basis. Die Zellen können so eingestellt werden, dass nur Wellenlängen transmittiert werden, die für das Pflanzenwachstum auf dem darunterliegenden Feld notwendig sind. Das in der Schicht absorbierte Licht dient der Stromproduktion.

Abbildung 4: Morpho-Color® Modulmuster (Fraunhofer ISE)

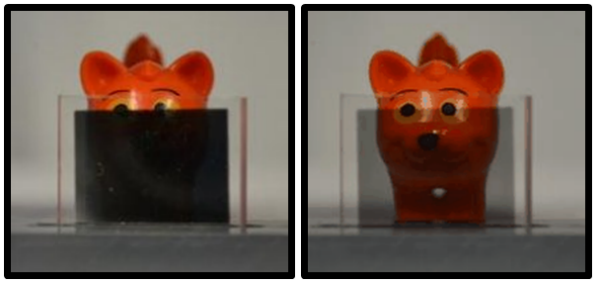

Abbildung 5: PV als schaltbare Glasbeschichtung (DLR)

Die in Entwicklung befindlichen schaltbaren Schichten können Tageslicht bei Bedarf farbneutral transmittieren. Bei hoher Einstrahlung lässt sich ihre Absorption durch einen Schaltvorgang massiv erhöhen, sie können dann Strom erzeugen und bieten gleichzeitig Sonnenschutz. Diese steuerbare Multifunktionalität ermöglicht eine PV-Integration auch in transparenten Teilflächen von Fassaden.
Kleinformatige Solarzellen, bspw. in geschindelter Verschaltung, ermöglichen dreidimensionale Flächen für gewölbte Fahrzeugdächer. Erste Muster von großflächigen PKW-Glasdächern im Vollformat mit einer selektiven Farbschicht und dahinter verborgenen Solarzellen in Schindelverschaltung wurden 2019 auf der IAA in Frankfurt gezeigt. Für die Gebäudeintegration werden flexible Formate benötigt, um den gestalterischen Spielraum der Archi-

tekten nicht einzuschränken. Mit Schindelstrings lassen sich Stringlängen und damit Formate sehr leicht anpassen.

4. F&E-Bedarf

Integrierte PV betritt regelmäßig interdisziplinäre Felder für Forschung und Entwicklung. Im Vordergrund stehen nicht mehr allein der Jahresstromertrag und die Stromgestehungskosten, es kommen hochspezifische Randbedingungen, Zielsetzungen und Belastungen von Seiten der Anwendung hinzu. Forschungsprojekte müssen daher ein breites Spektrum an F&E-Themen adressieren.
Bei Integration in Hüllen sind die Betriebsbedingungen der Module meist geprägt von inhomogener Einstrahlung und erhöhten Betriebstemperaturen. Beide Effekte können sich negativ auf Ertrag und Zuverlässigkeit auswirken. In der Agro-Photovoltaik verdienen nicht nur die Ertragsgewinne durch bifaziale PV-Technologien eine besondere Betrachtung, sondern auch das Pflanzenwachstum, das Mikroklima und die Bodenfeuchte unter dem PV-Kraftwerk. Analog stellen sich Fragen für die schwimmende Photovoltaik bezüglich der Wechselwirkungen mit dem Gewässer.
In Fahrzeugen und Lärmschutzwänden sind die Module dauerhaft Vibrationen ausgesetzt, bei schwimmender PV einer anhaltend hohen Luftfeuchte, möglicherweise in salziger Umgebung. Diese Belastungen werden durch Prüfungen nach aktuellen Normen nicht ausreichend abgedeckt. Besonders für die Gebäudeintegration wäre eine Lebensdauer jenseits 40 Jahre ein wichtiges Verkaufsargument. F&E muss die zugehörigen Degradationspfade analysieren, realistische beschleunigte Prüfprogramme und numerische Simulationsmethoden definieren sowie das Design der Zellen und Module für die Anwendungen optimieren. Bei neuen Verbindungstechnologien wie dem Schindeln und dem bleifreien Kleben und Löten sind die Kosten weiter zu senken, mit scharfem Blick auf die Zuverlässigkeit. Bei Dünnschichtmodulen müssen nachträgliche Verschaltungs- und Skalierungskonzepte weiterentwickelt und optimiert werden. Größere Entwicklungsanstrengungen sind auch bei spektral selektiven und schaltbaren Schichten zu leisten, um Kosten und Beständigkeit zu optimieren.
Neben den speziellen technischen und technologischen Aspekten integrierter Solarmodule spielt das Thema Akzeptanz eine wesentliche Rolle. So sind bei der Gebäudeintegration insbesondere gestalterische Freiheiten (Form, Farbe, Transparenz, Materialität) entscheidend und weniger die Moduleffizienz. Daher gilt es bei der BIPV vorrangig auch darum, die Anwender, also die Architekten und Planer sowie die Bauherren in die Entwicklung multifunktionaler Bauelemente einzubeziehen, um praxistaugliche Komponenten zu entwickeln, die sowohl die herkömmlichen Funktionen eines Bauelementes bieten, als auch Strom erzeugen können.
Ein weiterer Aspekt ist die Nachhaltigkeit der Integrierten PV hinsichtlich ihres CO_2-Fußabdrucks, der Verwendung kritischer Materialien und der Recyclingfähigkeit. Über Methoden der Lebenszyklusanalyse sind die ökologisch sensiblen Parameter zu identifizieren und entsprechende Verbesserung bspw. bei Materialauswahl, Produktdesign und Lebensdauer abzuleiten.
Die Wirtschaftlichkeit und praktisch realisierbaren Potenziale der verschiedenen Integrationstechnologien müssen besser verstanden werden. Integrierte PV eröffnet jenseits der quasistandardisierten Module zur Aufdach- und Freiflächenmontage neue Chancen für die deutsche PV-Industrie. Die Potenziale liegen sowohl bei der Produktion der Komponenten, als auch im Maschinenbau. Diese wirtschaftspolitische Dimension gilt es zu analysieren, auch um sie bei einer zukünftigen Förderung der PV-Integration zu berücksichtigen. In Kooperationen zwischen Instituten, Industrie und Start-Ups aus den jeweiligen Anwendungsfeldern entstehen optimale Bedingungen für zukünftige Innovationen für die Integration.

5. Quellenverzeichnis

[1] Meta Study on Future Crosssectoral Decarbonization Target Systems in Comparison to Current Status of Technologies, Discussion Paper, Fraunhofer ISE, http://publica.fraunhofer.de/documents/N-503953.html, März 2018

[2] Schmid, T.; Trommsdorff, M.; Bopp, G.; Ehmann, A.; Franke, W.; Gimbel, E.; Högy, P.; Ketzer, D.; Obergfell, T.; Reyer, F.; Rösch, C.; Schindele, S. u.a. sowie Weinberger, N.; Weselek, A., Agrophotovoltaik: Beitrag zur ressourceneffizienten Landnutzung (APV-RESOLA), Vortrag auf der Konferenz "Innovationsgruppen für ein Nachhaltiges Landmanagement", Berlin, Februar 2019

[3] Emissionsbilanz erneuerbarer Energieträger - Bestimmung der vermiedenen Emissionen im Jahr 2016, Umweltbundesamt, Oktober 2017

[4] Entwicklung der spezifischen Kohlendioxid-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 – 2018, Umweltbundesamt, April 2019

[5] Karoline Fath, Technical and economic potential for Photovoltaic systems on buildings, Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie, September 2017

[6] Robby Peibst, Michael Rienäcker, Byungsul Min, Christina Klamt, Raphael Niepelt, Tobias F. Wietler, Thorsten Dullweber, Eduard Sauter, Jens Hübner, Michael Oestreich, Rolf Brendel, From PERC to Tandem: POLO- and p+/n+ Poly-Si Tunneling Junction as Interface Between Bottom and Top Cell , IEEE Journal of Photovoltaics, Vol. 9, No. 1, January 2019

[7] Romain Cariou, Jan Benick, Frank Feldmann, Oliver Höhn, Hubert Hauser, Paul Beutel, Nasser Razek, Markus Wimplinger, Benedikt Bläsi, David Lackner, Martin Hermle, Gerald Siefer, Stefan W. Glunz, Andreas W. Bett & Frank Dimroth, III–V-on-silicon solar cells reaching 33% photoconversion efficiency in two-terminal configuration, Nature Energy, Vol. 3, April 2018

[8] Christian Reise, Alexandra Schmid. Realistic Yield Expectations for Bifacial PV Systems – An Assessment of Announced, Predicted and Observed Benefits, 31st European PV Solar Energy Conference and Exhibition, September 2015, Hamburg

[9] Benedikt Bläsi, Thomas Kroyer, Oliver Höhn, Martin Wiese, Claudio Ferrara, Ulrich Eitner, Tilmann Kuhn, Morpho Butterfly Inspired Coloured BIPV Modules, 33rd European PV Solar Energy Conference and Exhibition, September 2017, Amsterdam