

Gigawatt-Photovoltaik mit Nanometer-Strukturen

Forschung für die wichtigste Energiequelle der Menschheit

GIGAWATT
PHOTOVOLTAIK mit
NANOMETER-STRUKTUR



Photovoltaik gegen den Klimawandel

Auf der Pariser Klimakonferenz im Jahr 2015 einigte sich die Staatengemeinschaft völkerrechtlich verbindlich darauf, die Erderwärmung auf deutlich unter 2 Grad und möglichst sogar unter 1,5 Grad gegenüber dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen. Das erfordert eine weitgehende Dekarbonisierung des gesamten Energiesystems schon in den kommenden zwei Dekaden. Photovoltaik (PV) ist global gesehen die wichtigste Technologie, um fossile Energieträger zu ersetzen und wird voraussichtlich mit 69 Prozent mehr als die Hälfte der weltweiten Primärenergie bereitstellen müssen [A1].

Nach der Transformation des fossilen Energiesystems werden in Deutschland etwa 2000 TWh pro Jahr an Energie benötigt [A1], was mit einer Vervielfachung des bisherigen Strombedarfs einhergeht. Legt man eine 25 bis 50 Prozent Versorgung durch PV zugrunde, lässt sich abschätzen, dass wir in Deutschland 500 bis 1000 GW an PV-Anlagen werden aufbauen müssen. Für Niedersachsen müssten 65 bis 130 GW aufgebaut werden, je nachdem wieviel Import von grüner Energie man als darstellbar annimmt. Bei der derzeitigen PV-Ausbaurate von 0,5 GW pro Jahr würde das 120 bis 240 Jahre dauern. Diese Zeit haben wir nicht. Wir brau-

chen also eine um den Faktor 6 bis 12 beschleunigte PV-Ausbaurate in Form von Dach-, Freiland- oder Agri-PV. Die beiden blauen Quadrate in Abbildung 1 zeigen die Größe der gesamten Modulfläche für 500 und 1000 GW PV bei 20 Prozent Modulwirkungsgrad.

Durch den Klimawandel werden sich Änderungen in der Temperatur [A2] und des Windes [A2] ergeben, was aber nur zu geringfügig geringeren Erträgen führen wird. Es gibt aber auch langfristige Trends in der Bewölkung und der Staubpartikel, die zu Änderungen von mehr als 10 Prozent bei der Einstrahlung geführt haben [A3]. Das komple-

xe Zusammenspiel zwischen Wolken und Strahlung besser zu verstehen [A4] und den Einfluss des Klimawandels auf die Wolken [A5] und damit für die Solarenergie besser prognostizieren zu können [A6] ist einer der Forschungsschwerpunkte des meteorologischen Instituts in Hannover.

Nanostrukturen für die Massenfertigung besserer Solarzellen

Solarzellen wandeln Sonnenstrahlung in elektrische Leistung. Sie bestehen aus 160 μm dickem kristallinen Silizium (c-Si) und haben einen Wirkungsgrad von etwa 22 Pro-

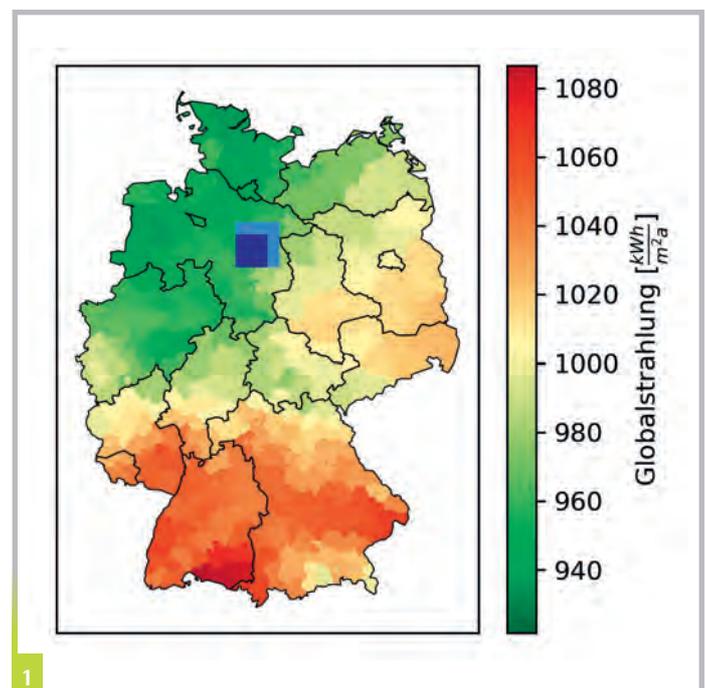


Abbildung 1
Grob geschätzter Flächenbedarf für Solarmodule in Deutschland für 500 und 1000 TWh jährlicher Stromerzeugung. Einstrahlungskarte: Weltbank 2019.
Quelle: LUH

zent. Silizium wird aus Quarz hergestellt und ist damit verfügbar „wie Sand am Meer“. Das im c-Si absorbierte Licht erzeugt Elektronen und Löcher. Die Solarzelle soll den Großteil der Energie dieser Elektronen und Löcher in elektrische Energie wandeln. Dafür ist die Solarzelle so gebaut, dass die Elektronen auf ihrem Weg zum Minuspol nur einen kleinen elektrischen Widerstand zu überwinden haben, während der gleiche Weg für die Löcher durch einen hohen elektrischen Widerstand blockiert ist. Diese selektive Wirkung erreichen heutige Solarzellen durch den Einbau von Phosphor (P)-Atomen in die Vorderseite der c-Si-Scheibe. Eine höhere Konzentration an P-Atomen bewirkt einen selektiveren Kontakt, der die Elektronen besser und die Löcher schlechter durchlässt. Wir haben uns die Frage gestellt und beantwortet, wie die Selektivität der Kontakte beider Polaritäten theoretisch beschrieben [B1] und im Experiment verbessert werden kann.

Die elektronenmikroskopische Aufnahme in Abbildung B-1 zeigt die Lösung [B2, B3]: Auf der Oberfläche der c-Si-Scheibe ist eine etwa 2 nm dünne Siliziumoxidschicht und darauf eine extrem hoch mit Phosphor dotierte 0,1 μm dicke Poly-Siliziumschicht. Das Erhitzen dieses POLO genannten Schichtsystems auf etwa 1000 $^{\circ}\text{C}$ führt zur Bildung von 2 bis 10 nm kleinen Löchern im Oxid. Durch diese kleinen Löcher können die P-Atome in den Si-Wafer eindiffundieren und durch sie fließt dann auch der Solarstrom [B4]. Die Löcher im Oxid machen nur etwa ein Millionstel der Solarzellenfläche aus. Die P-Konzentration im Poly-Silizium ist viel höher als die in der Oberfläche heutiger Solarzellen und verbessert dadurch die Selektivität der Kontakte. Unvermeidbare negative Begleiterscheinungen der hohen

Konzentration werden durch den kleinen Flächenanteil der Löcher begrenzt.

Mit den neuen POLO-Kontakten haben wir im Labor schon einen Wirkungsgrad von 26,1 Prozent erreicht [B5]. Das ist ein großer Fortschritt, weil die PV-Aufstellflächen und der Materialverbrauch im Vergleich zum heute üblichen Wirkungsgrad um 18 Prozent reduziert werden. Für eine

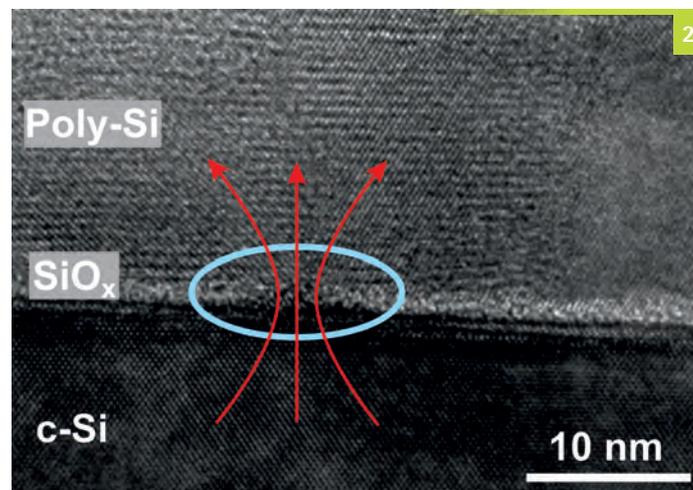


Abbildung 2
Elektronenmikroskop-Aufnahme eines POLO-Kontaktes: An der blau eingekreisten Stelle ist ein Loch im dünnen Oxid, welches das Poly-Si von der Siliziumscheibe trennt. Durch die kleinen Löcher fließt der Solarstrom.
Quelle: ISFH

Übertragung der Laborergebnisse in die weltweite Massenfertigung sind aber noch schwierige Entwicklungsfragen zu lösen an denen wir derzeit arbeiten: In welche Solarzellenstruktur sollen die neuen POLO-Kontakte integriert werden? Mit welchen Prozessen und Maschinen stellen wir das Poly-Silizium am besten und am günstigsten her? Was ändert sich für die Photovoltaikmodule, wenn sie aus neuen leistungsfähigeren POLO-Zellen bestehen? Derzeit werden erste Fertigungslinien für POLO-Zellen mit einigen GW an Jahreskapazitäten in Asien gebaut. Wir arbeiten dafür, dass bald auch in Deutschland große Fabriken für die Herstellung neuer Solarzellen entstehen, damit wir unsere Abhängigkeit von russischem Gas nicht durch neue Abhängigkeiten von anderen autokratischen Staaten ersetzen.

Die Forschung an den POLO-Solarzellen wird am Institut für Solarenergieforschung, am Institut für Materialien und Bauelemente der Elektronik, am Laboratorium für Nano- und Quantenengineering und am Institut für Festkörperphysik in Kooperationen mit zahlreichen Maschinenbauunternehmen durchgeführt und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz in Verbundprojekten [B6] gefördert.

Vollintegrierte und systemoptimierte Elektroniklösungen im Solarmodul

Seit Jahrzehnten verfolgen Wissenschaft und Industrie das Ziel einer direkt ins Solarmodul integrierten Elektronik, um die Installation, die Planung, die Anlagensicherheit und den Ertrag zu steigern. Trotz marktverfügbarer Produktlösungen konnte bisher keine Konkurrenzfähigkeit zu konventionellen Anlagenkonzepten erreicht werden. Die LUH forscht an neuen Solarmodulen mit integrierter Elektronik für Anwendungen wie zum Beispiel Einfamilienhäuser und kleinen Balkon-Systemen damit diese konkurrenzfähig werden. Hierfür müssen die PV-Module im Vergleich zum heutigen Stand „intelligent“ werden, damit sie Systemdienstleistungen im Stromnetz erbringen können

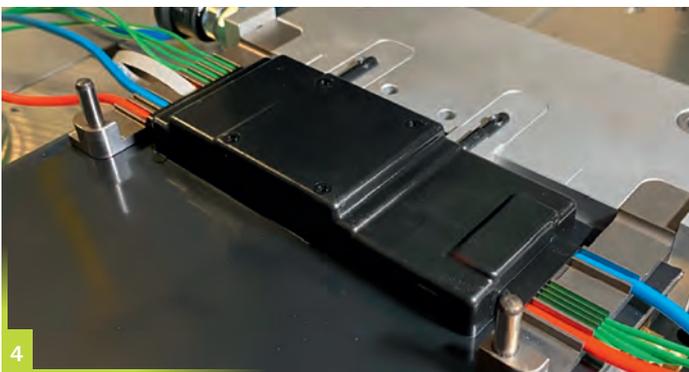
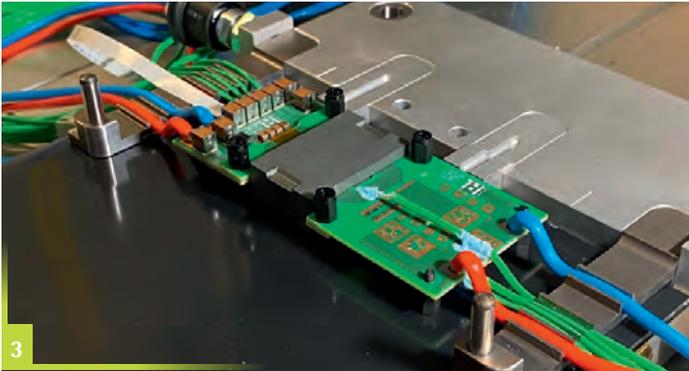


Abbildung 3
Elektronik am Testmodul vor dem Vergussprozess
Foto: IAL

Abbildung 4
Elektronik am Testmodul nach dem Vergussprozess
Foto: IAL

und benutzerfreundlich in die Steuerungen von „Smart Home“-Systemen integrierbar werden. Idealerweise geschieht das unter Beachtung weltweiter Standards.

Das alles soll mit einer Elektronik erreicht werden, die mittels eines neuartigen Vergussprozesses verkapselt und direkt am PV-Modul befestigt

wird. Dadurch entfällt ein Teil der elektrischen Verkabelung und die Zuverlässigkeit wird erhöht. Zusätzlich wird durch eine angepasste Antenne eine fehlertolerante kabellose Kommunikation mit einem sogenannten IoT-Mesh (IoT = Internet of Things, Mesh = dynamisches Kommunikationsnetz) umgesetzt und im Verbund mehrerer PV-Module an einem Testdach des ISFHs über mehrere Monate getestet und ausgewertet. Elektronische Schaltungskonzepte werden untersucht, die nicht nur mit weniger Materialien auskommen, sondern auch andere als die heute üblichen Lieferketten zu verwenden erlauben. Das soll dazu beitragen, die Auswirkungen einzelner Krisenregionen auf unsere Energiewende zu reduzieren. Die hier skizzierten „intelligenten“ Solarmodule eignen sich nicht nur für die Hausdächer, sondern auch für andere städtische Flächen, wie zum Beispiel Fassaden. Ein Testaufbau, bestehend aus Elektronik und PV-Modul, ist in *Abbildung 3* vor- und in *Abbildung 4* nach dem Vergussprozess dargestellt.

In diesem Themenfeld kooperieren das Institut für Antriebssysteme und Leistungselektronik, das Institut für Mi-

kroelektronische Systeme, das Institut für Hochfrequenztechnik und Funksysteme und das ISFH in enger Abstimmung mit mehreren Industriepartnern. Die Forschungsarbeiten werden neben Projektförderung durch das BMWK auch durch Mittel der DBU unterstützt und durch internationale studentische Aktivitäten in Fachverbänden mit hoher Sichtbarkeit (IEEE) ergänzt.

Schnelle Rechenmethoden für eine genaue Ertragsvorhersagen in Städten

Photovoltaik kann im Unterschied zur Windenergie auch in urbanen Gebieten für die dezentrale Energieversorgung eingesetzt werden. Die urbane Verdichtung und der hohe städtische Strombedarf werden geeignete Flächen für PV-Anlagen zu einem knappen Gut machen. Genaue Ertragsprognosen sollten die reale städtische Umgebung berücksichtigen und auch die Gebäudefassaden einschließen. Für die Auslegung dezentraler Energiesysteme muss die solare Einstrahlung in der Ebene der Gebäudeflächen unter Berücksichtigung von komplexer und zeitabhängiger Verschattung sowie Lichtreflexionen

Abbildung 5
Jahressumme der solaren Einstrahlung für einen Bereich des LUH-Campus dargestellt.
Quelle: CC-BY-4.0, Landeshauptstadt Hannover, Bereich Geoinformation

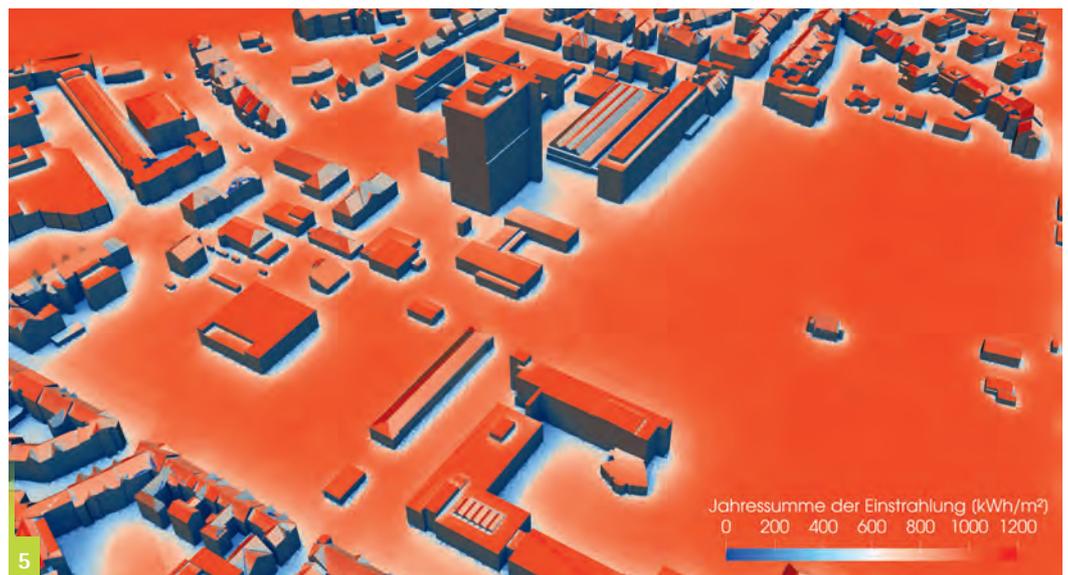




Abbildung 6
Aufgebautes Demonstrator-
Fahrzeug mit Leichtbau-Solar-
modulgeneration
Foto: ISFH

in der Umgebung berücksichtigt werden [D1].

Um das zu ermöglichen, führen wir Geoinformationen aus mehreren Quellen zusammen und bereiten diese zu einem 3D-Stadtmodell auf. Dieses Stadtmodell bildet die Grundlage für optische Strahlverfolgungssimulationen, welche durch einen hochgradig parallelisierten Ansatz stark beschleunigt werden. Das Ergebnis ist ein zeitlich aufgelöstes Solarkataster für sowohl Dach- als auch Fassadenflächen des gesamten Stadtgebietes. Durch die zeitliche Auflösung können Einsparungen durch die stündliche Bilanzierung von PV-Ertrag und Stromverbrauch bereits in der Planungsphase einer PV-Anlage berechnet werden.

Die Simulationsarbeiten werden vom Institut für Festkörperphysik durchgeführt und werden Strahlungsverteilungen nutzen, die derzeit mit neuen Messtechniken des Instituts für Meteorologie und Klimatologie gewonnen werden [A4].

Fahrzeugintegrierte Photovoltaik für größere Reichweiten

Die Emissionen des Transportsektors sind mittlerweile der drittgrößte Beitrag an Treibhausgasemissionen in Deutschland, wobei die Emissionen dieses Sektors seit län-

gerer Zeit stagnieren. Die Elektromobilität kann einen großen Beitrag zur Emissionsreduktion leisten, wenn die elektrische Energie erneuerbar bereitgestellt wird. Fahrzeugintegrierte Photovoltaik ist ein attraktiver Ansatz mit hohem Nutzerkomfort. Die Forschungspartner haben ein PV-Lieferfahrzeug aufgebaut, das die Leistung über einen DCDC-Wandler in die Hochvoltbatterie einspeist. Mehr als 8000 km Testfahrten im Weserbergland wurden absolviert, wobei an sonnigen Sommertagen Reichweitenverlängerungen von bis zu 36 km nachgewiesen wurden [E1]. Eine weitere Steigerung auf über 50 km pro Tag wäre mit schon jetzt umsetzbaren Maßnahmen, zu denen zum Beispiel einer weiteren Steigerung der Ketteneffizienz der Leistungselektronik und des Pufferspeichers von derzeit 69 % [E1], möglich. Parallel dazu wurde anhand systematischer Einstrahlungsmessungen mit hoher Zeitauflösung, in Verbindung mit dynamischer Modellierung der Solarmodule, die notwendige Nachregel-frequenz des optimalen Arbeitspunktes unter transienter Teilverschattung zu 50 Hz bestimmt [E2].

Diese Arbeiten wurden vom Institut für Bauelemente der Elektrotechnik, dem Institut für Solarenergieforschung und weiteren Partner aus Industrie und Forschung im Rahmen eines BMWK-gefördert Projek-

tes durchgeführt und haben in die Arbeit des „International Energy Agency Photovoltaic Power System Programm“ namens „Task 17 - PV for Transport“ Eingang gefunden.

Zusammenfassung

Die Photovoltaik ist bei uns in Deutschland und weltweit eine ganz zentrale Komponente der zukünftigen zunehmend vernetzten Energiesysteme. Die Photovoltaikforschung an der LUH erstreckt sich über die Fachbereiche der Meteorologie, der Physik, der Elektrotechnik und Informatik, des Maschinenbaus, der Bauphysik, und der Landschafts- und Umweltplanung. Unsere Forschung trägt dazu bei, Photovoltaik noch kostengünstiger und noch ressourcenschonender zu machen als sie heute schon ist. Solche Forschung erleichtert den globalen „PV-Roll-Out“, den wir für eine lebenswerte Zukunft der Menschheit dringend brauchen. „PV made in Europe“ ist zudem eine große Chance für unsere Wirtschaft, für spannende neue Arbeitsplätze [A1] und für die Reduktion der politischen Abhängigkeit von Autokratien.

Auf Literaturangaben musste leider verzichtet werden. Eine Version dieses Textes mit Referenzen stellen die Autoren hier bereit: <https://www.energie.uni-hannover.de/de/information/downloads>.

Prof. Dr.-Ing. Rolf R. Brendel
Prof. Dr.-Ing. Jens Friebe
Dr. Robby Peibst
Dr. Dennis Bredemeier
Prof. Dr. Gunther Seckmeyer

→ Infos und Kontaktdaten
ab Seite 68