



Jahresbericht
2013/14

Titelfoto:

Mikro- und Nanostrukturierte Oberflächen werden am Fraunhofer ISE für das Photonenmanagement in optischen Systemen (beispielsweise in Solarzellen, Beleuchtungssystemen, optischer Sensorik oder Displayanwendungen) entwickelt. Die großflächige Herstellung solcher Oberflächenstrukturen in maßgeschneiderten Formen und Dimensionen ist die Grundlage für eine industrielle Umsetzbarkeit. Die am Fraunhofer ISE etablierte Technologie der Interferenzlithographie bietet dafür einzigartige Möglichkeiten, sowohl hinsichtlich der nahtlos strukturierbaren Fläche (bis 1,2 x 1,2 m²) als auch in Bezug auf die Strukturvielfalt. In Architektur und Infrastruktur des 2013 eingeweihten Laborgebäudes flossen die Anforderungen dieser Technologie ein. Die implementierten Maßnahmen zur Verbesserung der Prozessstabilität führen dazu, dass nun durch Interferenzlithographie noch anspruchsvollere Strukturen in einer höheren Reproduzierbarkeit und Genauigkeit gefertigt werden können (Seite 132/133).

VORWORT



Die schwierige wirtschaftliche Lage der deutschen Photovoltaik-Branche und die gesellschaftliche und politische Verunsicherung bezüglich der Energiewende in Deutschland haben Entwicklung und Strategie unseres Instituts auch 2013 stark beeinflusst. Den riesigen globalen Überkapazitäten der PV-Industrie – besonders der ca. 60 GW Produktionskapazität in China – stand 2013 ein rasch wachsender Weltmarkt von »nur« rund 35 GW gegenüber. Die Modulpreise fielen stark, und Überkapazitäten wurden zu Billigstpreisen abgebaut. Dabei konnten viele Hersteller nicht mehr kostendeckend mithalten, was sich auch in Deutschland bemerkbar machte. Hier kam noch hinzu, dass sich die Branche im Umbruch befindet. Die anhaltende Diskussion um das Erneuerbare Energien Gesetz (EEG) und die Ausgestaltung der Energiewende führten zu einer spürbaren Investitionszurückhaltung. Die Folge war, dass sich namhafte deutsche Hersteller aus der Photovoltaik zurückzogen. Einige wichtige Marktteilnehmer konnten nur Dank Finanzierung durch Partner aus Asien und dem Nahen Osten überleben.

Die positive Seite der Marktentwicklung ist, dass die günstigen Preise für Solarmodule und -systeme der Technologie neue Märkte eröffnen. So wächst der Weltmarkt stark – wir erwarten 2014 ein Jahresvolumen von deutlich über 40 GW. In den kommenden Jahren bereits wird sich die Schere zwischen Überkapazität und globaler Nachfrage wieder schließen, und die Bestellungen werden wieder zunehmen. Um die PV-Branche in Deutschland zu unterstützen, so dass sie vom nächsten Nachfrageboom profitieren kann, arbeitet das Fraunhofer ISE intensiv am Projekt »xGWp« mit. Dahinter steht die Initiative eines europäischen Konsortiums unter Beteiligung führender Forschungsinstitute, namhafter PV-Ausrüster und weiterer Industrie- und Forschungspartner. Ziel des Konsortiums ist es, eine beispielhafte europäische PV-Fertigung aufzubauen, in der Zellen und Module neuester Technologien hochautomatisiert im GW-Maßstab kostengünstig hergestellt werden, so dass sie zu den derzeitigen Marktpreisen profitabel verkauft werden können. Auf diese Weise soll eine Basis für

den weiteren Erfolg der europäischen PV-Technologie auf dem Weltmarkt geschaffen werden.

Gleichzeitig haben mit der in Deutschland geplanten Energiewende neben der Photovoltaik auch andere erneuerbare-Energien-Themen an Bedeutung gewonnen. So ist deutlich erkennbar, dass Technologie-übergreifende Systemansätze wichtiger werden. Das Fraunhofer ISE mit seiner breiten und interdisziplinären Expertise ist dafür sehr gut aufgestellt. Wir bieten unsere FuE-Leistungen erfolgreich für Photovoltaik-Technologien an, beschäftigen uns aber bereits seit Jahrzehnten auch mit Solarthermie, Speichertechnologien, energieeffizienter Leistungselektronik, Systemintegration von Strom, Wärme und Gas, Energieeffizienz von Gebäuden und emissionsfreier Mobilität sowie mit Energiesystemanalysen. Um diese vielfältigen Kompetenzen und Synergien im Institut noch besser zu nutzen und auf die veränderten Märkte und Förderstrukturen abzustellen, hat das Fraunhofer ISE 2013 einen grundlegenden Strategieprozess begonnen. So können wir unsere Positionierung schärfen und unsere Ressourcen noch besser fokussieren. 2014 werden wir diesen Prozess weiter fortsetzen.

2013 publizierten Prof. Dr. Hans-Martin Henning und Andreas Palzer ein umfassendes Modell eines zukünftigen deutschen Strom-, Gas- und Wärmesystems unter der Voraussetzung einer großen Durchdringung mit erneuerbaren Energien »REMoD-D«. Die detaillierte Modellierung aller 8760 Stunden des Jahres zeigte, dass ein System mit 70% erneuerbaren Energien im Primärenergieverbrauch eine stabile Energieversorgung zu Kosten garantieren kann, die in der Nähe unseres heutigen Energiesystems liegen. Im Vergleich dazu käme eine Fortführung des augenblicklichen, wesentlich auf fossilen Energien bestehenden Systems bedeutend teurer. Bereits bis zu einem angenommenen Zieljahr 2050 werden die erforderlichen Investitionen durch die Ersparnisse übertroffen. Die Energiewende wird also insgesamt von finanziellem Vorteil für unsere Volkswirtschaft sein!

Unsere ganzheitliche, systemische Betrachtungsweise zeigt sich auch im 2013 neu vorgestellten »Energy Transformation Index (ETI)«. Damit hat das Fraunhofer ISE ein ganz neues Länder-Ranking zur Energiewende entwickelt. Bislang gab es keinen methodischen Ansatz, mit dem der Fortschritt einzelner Länder und Regionen auf dem Weg zur Energiewende quantitativ beschrieben werden konnte. Der zum ersten Mal auf der Jahrestagung der International Solar Energy Society ISES im November 2013 vorgestellte Index zeigt in übersichtlicher Form, wie weit die Energiewende in verschiedenen Ländern weltweit vorangekommen ist. Der Index ist der Durchschnitt aus der normierten Energieeffizienz und dem Anteil der erneuerbaren Energien am Primärenergieverbrauch. Energieeffizienz wird hier als Quotient von Bruttoinlandprodukt (BIP) und dem Primärenergieverbrauch definiert. Als Zielwert für die Normierung der Effizienz haben wir zwei Dollar pro Kilowattstunde angesetzt, das ist etwa das Doppelte der aktuellen Effizienz heutiger Industrieländer. Natürlich sind auch normierte Effizienzwerte größer als die so definierten 100% möglich und erstrebenswert. Mit diesem neuen Ansatz haben wir bislang 46 Länder sowie den EU-Durchschnitt bewertet. Dabei zeigte sich, dass Deutschland im Ranking aktuell gleichauf mit Japan und Großbritannien auf dem mittleren Platz 14 liegt. Die Energiewende ist hierzulande also in diesem Vergleich noch nicht so weit fortgeschritten wie allgemein angenommen wird. Während dieses Ranking natürlich stark von den jeweiligen Ausgangssituationen abhängt, wird es sehr interessant werden, die weitere Entwicklung des ETI der einzelnen Länder zu verfolgen. Wir werden daher den ETI künftig regelmäßig zusammen mit der International Solar Energy Society ISES veröffentlichen.

Das Fraunhofer ISE hat 2013 seine internationale Vernetzung durch neue Kooperationen und Partnerschaften weiter gestärkt. So unterzeichnete das Institut ein Memorandum of Understanding mit der International Renewable Energy Agency IRENA in Abu Dhabi, um die bestehende Zusammenarbeit zu vertiefen. Ferner wurde mit dem indischen Ministerium für Neue und Erneuerbare Energie MNRE eine

Kooperationsvereinbarung unterschrieben. Im Fokus stehen hierbei besonders Forschungs-, Demonstrations- und Pilotprojekte zu Photovoltaik, Solarthermie und Wasserstoff. Zudem gründeten die Fraunhofer-Gesellschaft und die University of British Columbia UBC in Kanada eine neue Forschungsallianz. Beide wollen künftig gemeinsam nachhaltige Konzepte für die Energiegewinnung und -versorgung der Zukunft entwickeln. Daran ist das Fraunhofer ISE maßgeblich beteiligt.

Auch im vergangenen Jahr hat das Fraunhofer ISE technologische Höchstleistungen gezeigt. So konnten wir gemeinsam mit Soitec, CEA-Leti und dem Helmholtz-Zentrum Berlin einen neuen Weltrekord für die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom erzielen. Die Rekordsolarzelle basiert auf einer neuen Struktur mit vier Teilsolarzellen. Nach kaum mehr als drei Jahren Forschung konnte ein neuer Rekordwirkungsgrad von 44,7 Prozent bei einer 297fachen Konzentration des Sonnenlichts gemessen werden. Ein bedeutender Schritt hin zu einer weiteren Kostensenkung für Solarstrom und auf dem Weg zur 50-Prozent-Solarzelle.

Ein großes Highlight war für uns 2013 die Einweihung des neuen Laborgebäudes in Freiburg. Auf einer Laborfläche von 2400 m² sind darin nun unsere Querschnittskompetenzen für Solarthermie und Photovoltaik unter einem Dach untergebracht. Wir arbeiten dort an Beschichtungen, Mikrostrukturen sowie optischen und photonischen Anwendungen für die Wärme- und Stromgewinnung. Im Neubau werden u. a. Materialien und Verfahren zur Beschichtung von Absorberrohren für solarthermische Kraftwerke oder mikrostrukturierte Oberflächen zur Optimierung von Solarzellenoberflächen, Antireflex-Solarglas oder Displays entwickelt. Des Weiteren sind dort Anlagen zur Funktionalisierung und Veredelung von Oberflächen sowie zur Analyse von Oberflächeneigenschaften untergebracht. Als weiteres Thema verfolgen wir im Laborneubau die Charakterisierung und Entwicklung von Konzentratoroptiken. Auf dem Gebäudedach befindet sich ein kleines Außenversuchsfeld für unterschiedliche Typen von Konzentrator Kollektoren.

Ein Forscherteam des Fraunhofer ISE entwickelte das Energieeffizienz-Konzept des Neubaus und setzte es gemeinsam mit Planern, Architekten und Industriepartnern um. Beim Laborgebäude kommen zudem neueste, vom Fraunhofer ISE entwickelte Technologien zur praktischen Anwendung. Das sind zum einen Photovoltaikmodule mit winkelselektiver Transmission in der Fensterbrüstung des Seminarraums. An der Südwest-Fassade kommen neuartige kristalline PV-Module für die Verkleidung der Außenwand zum Einsatz. Sie basieren auf innovativer Solarzellentechnologie mit rückseitiger Kontaktierung – nach dem hausintern entwickelten und patentierten High Performance Metal Wrap Through (HIP-MWT)-Konzept. Die Solarzellen wurden im Photovoltaik-Technologie Evaluations Center (PVTEC) des Fraunhofer ISE in einer Pilotfertigungslinie hergestellt. Die Verschaltung erfolgt mittels strukturierter Zellverbinder, die am Fraunhofer ISE entwickelt und patentiert wurden. Innovativ ist auch die Verkapselung der verschalteten Solarzellen zwischen zwei Gläsern, basierend auf der randversiegelten Modultechnologie, ebenfalls ein Patent des Fraunhofer ISE.

So ist der Laborneubau für uns in vielerlei Hinsicht von großer Bedeutung. Wir sind dem Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF und dem Ministerium für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg, die die Kosten des Gebäudes je hälftig trugen, sehr dankbar für ihr klares Bekenntnis zu Investitionen in Forschung und Entwicklung für die Energiewende und für die Unterstützung der Arbeit des Fraunhofer ISE. Das neue Gebäude ist für uns eine gute Grundlage und auch Ansporn, weitere Durchbrüche in der angewandten Forschung für erneuerbare Energien zu erzielen.

Unser Fraunhofer ISE Campus mit dem neuen Laborgebäude ist zudem ein Baustein des in Planung befindlichen Nationalen Leistungszentrums für Nachhaltigkeitsforschung, das im Kern eine intensive Zusammenarbeit der fünf hier ansässigen Fraunhofer-Institute mit der Technischen, aber auch anderen Fakultäten der Universität Freiburg zum Thema Nachhaltigkeit umfasst. Die fünf Fraunhofer-Institute werden sich dazu ge-

meinsam in der Schaffung eines neuen Instituts für »Sustainable Systems Engineering« innerhalb der Technischen Fakultät engagieren. Gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft plant die Fraunhofer-Gesellschaft in mehreren deutschen Städten die Schaffung nationaler Leistungszentren mit einem klaren thematischen Profil. Ziel ist, exzellente Forschung und Lehre sowie wirtschaftliche Aktivitäten in der Region und darüber hinaus noch besser zu integrieren

Am 29. November 2013 konnten wir einen besonderen Ehrentag feiern. Prof. Dr. Adolf Goetzberger, der das Institut vor mehr als 30 Jahren gründete und noch heute für das Fraunhofer ISE aktiv ist, beging seinen 85. Geburtstag.

Und schließlich begann das neue Kalenderjahr mit einer großen Ehrung für das Fraunhofer ISE, und auch für mich persönlich. Ich konnte auf dem World Future Energy Summit in Abu Dhabi den Zayed Future Energy Prize 2014 in der Kategorie Nongovernmental Organization (NGO) für das Fraunhofer ISE aus den Händen des Kronprinzen von Abu Dhabi in Empfang nehmen. Zu den Bewertungskriterien für die Vergabe des mit 1,5 Millionen US-Dollar dotierten Preises gehörten unsere Zukunftsfähigkeit und unser Innovationspotenzial.

Unser ausdrücklicher Dank gilt unseren Kuratoren und Stipendiengebern, unseren Ansprechpartnern in den Ministerien auf Bundes- und Länderebene sowie von den Projektträgern – ganz besonders unseren Industriepartnern – für die Unterstützung und Förderung unseres Instituts. Diese vertrauensvolle Zusammenarbeit ist die Grundlage für unser Engagement für eine CO₂-freie globale Energieversorgung.



Aktuelle Vorträge und Veröffentlichungen
von Prof. Dr. Eicke R. Weber:
www.ise.fraunhofer.de/vortraege-prof-weber

INHALTSVERZEICHNIS

- 8** Organisationsstruktur
- 10** Das Institut im Profil
- 12** Neue Außendarstellung in 12 Geschäftsfeldern
- 14** Preise und Ehrungen
- 15** Kuratorium

16 ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE

- 19** LowEx-Versorgungskonzept mit integriertem Kaltwasserspeicher
- 20** Gebäudebetrieb in Interaktion mit dem Energieversorgungsnetz
- 21** Feldmessungen großer Wärmepumpen
- 22** Modellbasierte Qualitätssicherung des Gebäudebetriebs
- 23** Innovative Energiemanagementsysteme für Gebäude im Smart Grid

24 SILICIUM - PHOTOVOLTAIK

- 27** Eindiffusion von Verunreinigungen in mc-Silicium Blöcke
- 28** Technologieentwicklung für Solarzellen aus UMG-Silicium
- 30** Float-Zone-Kristalle aus vorgezogenem Feedstock
- 31** Slurry basierter Drahtsägeprozess mit strukturierten Drähten
- 32** Siliciumwafer-Herstellung mit diamantbesetztem Sägedraht
- 33** Vorhersage von Solarzellenparametern multi-kristalliner Wafer
- 34** Solarzellen mit epitaktischen Emittlern mit 20% Wirkungsgrad
- 35** Gesputtertes Aluminiumnitrid zur Passivierung von Solarzellen
- 36** Industrietaugliche Co-Diffusionsprozesse für n-Typ Si-Solarzellen
- 37** PassDop-Prozess: Industriennahe Realisierung einer PERC-Struktur
- 38** Passivierte Kontakte für hocheffiziente Silicium-solarzellen
- 39** Einfache n-Typ Siliciumsolarzellkonzepte mit PERC-Technologie
- 40** Produktionstechnologie für Silicium-Heterosolarzellen

- 41 Prozesse für industrielle Rückseitenkontakt-Solarzellen
- 42 Hochdurchsatz-Metallisierung mit rotativen Druckverfahren
- 43 Innovative Folienelektrode für passivierte Solarzellen
- 44 Solarmodule mit Zellkontakten aus Nickel und Kupfer
- 45 Simulationsmodelle für hocheffiziente Solarzellenkonzepte

- 46 **III-V- UND KONZENTRATOR-PHOTOVOLTAIK**
 - 49 Höchsteffiziente III-V Mehrfachsolarzellen mittels Wafer-Bonden
 - 50 Niedrigkonzentrierende PV (LCPV): Si-Solarzellen und Receiver
 - 51 Concentrator PV and Thermal (CPVT): System- und Receiver-Entwicklung
 - 52 Photovoltaische Zellen für die optische Leistungsübertragung
 - 53 System zur hochaufgelösten Vermessung der Zirkumsolarstrahlung

- 54 **FARBSTOFF-, ORGANISCHE UND NEUARTIGE SOLARZELLEN**
 - 57 Konzepte für in-situ Herstellung von Perowskit-Solarzellen
 - 58 Fertigungs- und Anwendungspotenziale organischer Solarzellen
 - 59 Mehr Strom – durch Hochkonversion mehr Sonnenlicht nutzen
 - 60 Höchsteffiziente Mehrfachsolarzellen auf kristallinem Silicium
 - 61 Photonische Konzepte für Solarzellen im strahlenden Limit

- 62 **PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND KRAFTWERKE**
 - 65 Leitfähiges Kleben – flexibel, zuverlässig und bleifrei
 - 66 Direktes Kontaktieren von Aluminium durch Ultraschalllötten
 - 67 Large Area Referenzzelle LARC®
 - 68 Schadensanalytik an PV-Modulen am Beispiel »Schnecken Spuren«
 - 69 UV-Stabilität von Polymermaterialien in PV-Modulen
 - 70 Präzise Leistungs- und Performance-Bewertung von PV-Kraftwerken
 - 71 PID – Theorie und Praxis
 - 72 PV-Kraftwerke produzieren mehr Strom als erwartet
 - 73 Betriebsverhalten von komplexen BIPV-Anlagen mit a-Si/ μ -Si-Modulen

- 74 **SOLARTHERMIE**
 - 77 Thermoaktive Bauteile aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC)
 - 78 Heizen und Kühlen mit transparenten Fassadenkollektoren
 - 79 Modellbasierte Messdatenanalyse von SolarAktivHäusern
 - 80 Integration von solarer Prozesswärme in Wäschereibetriebe
 - 81 Entwicklung von Membrandestillationsmodulen und -systemen
 - 82 Systementwicklung und Betriebsanalyse solare Kühlung
 - 83 Konzentratoroptik: vom Design zum Produkt
 - 84 Speichertechnologien für Linear-Fresnel-Kraftwerke
 - 85 Technologiemiixoptimierung für Solar- und Windpark in Kuwait
 - 86 Polymeranalytik für die Solarthermie der Zukunft

- 88 WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLENTÉCHNOLOGIE**
 - 91** Ortsaufgelöste Charakterisierung automobiler Brennstoffzellen
 - 92** Autonomes Brennstoffzellensystem für die Telekommunikation
 - 93** Neues Verdampfungsverfahren – saubere Zukunft für die Ölheizung

- 94 SYSTEMINTEGRATION UND NETZE – STROM, WÄRME, GAS**
 - 97** Entwicklung ländlicher Regionen mit Hilfe von Photovoltaik
 - 98** Chancen und Herausforderungen von Solarbatteriesystemen
 - 99** Effiziente Betriebsführung von Elektrolyseuren in Power-to-Gas-Systemen
 - 100** Integrale Energiekonzepte für Städte und Quartiere

- 102 ENERGIEEFFIZIENTE LEISTUNGSELEKTRONIK**
 - 105** Hocheffiziente induktive Energieübertragung für Elektrofahrzeuge
 - 106** Hocheffiziente Leistungselektronik für die Mittelspannung
 - 107** Wie reagieren Wechselrichter auf Fehler im Stromnetz?

- 108 EMISSIONSFREIE MOBILITÄT**
 - 111** Entwicklung von innovativen Batteriemanagementsystemen
 - 112** Fahrzeugbasierte Netzüberwachung und Netzstabilisierung
 - 113** Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität

- 114 SPEICHERTECHNOLOGIEN**
 - 117** Hausbatteriesystem zur Zwischenspeicherung von PV-Strom
 - 118** Phasenwechselflüssigkeiten als Kältespeicher für Wärmepumpensysteme
 - 119** Chemischer Speicher: Konversion von CO₂ und H₂ zu Methanol
 - 120** Entwicklung und Optimierung von Redox-Flow-Batterien
 - 121** Aktive Latentwärmespeicher in solarthermischen Kraftwerken

- 122 ENERGIESYSTEMANALYSE**
 - 125** Wirtschaftlichkeit von Photovoltaik in der MENA-Region
 - 126** Regionale Modellierung der Energieverteilung
 - 127** Integrierte Wärme- und Kältestrategie für Deutschland

128 KOMPETENZFELDER

- 130** Wärmetransformation
- 132** Funktionale Mikro- und Nanostrukturen auf großen Flächen

134 SERVICEBEREICHE

- 138** Kalibrieren von Solarzellen nach internationalen Standards
- 139** Präzise Charakterisierung von PV- und CPV-Modulen
- 140** TestLab PV Modules
- 141** Prüfen und Mitgestalten im TestLab Solar Thermal Systems
- 142** Vermessung von Fassaden und transparenten Bauteilen
- 143** Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken
- 143** Batterie-Prüflabor
- 144** Inverter Laboratory
- 144** Lichtlabor
- 145** SmartEnergyLab für thermisch-elektrische Gebäudeenergiesysteme
- 145** Teststand für Wärmepumpen
- 146** Prüfung und Entwicklung von Wärmeübertragern
- 146** PCM-Labor: Charakterisierung von Latentwärmespeichermaterialien
- 147** Prüflabor für poröse Materialien und Werkstoffe
- 147** Testzentrum Brennstoffzelle

148 ANHANG

- 148** Gastwissenschaftler
- 150** Promotionen
- 152** Ausgewählte Gremien
- 153** Lehrveranstaltung
- 154** Erteilte Patente
- 156** Impressum



ORGANISATIONSTRUKTUR

Die Organisationsstruktur des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE basiert auf zwei parallel verlaufenden, sich wechselseitig ergänzenden Komponenten: den Geschäftsfeldern und den wissenschaftlichen Bereichen. Die Außendarstellung unseres Instituts, unsere Marketingaktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung (FuE) und vor allem unsere Strategieplanung orientieren sich an zwölf Geschäftsfeldern, die die inhaltlichen Schwerpunkte unserer Forschungstätigkeiten widerspiegeln. Die wissenschaftlichen Bereiche des Instituts sind für FuE in den Labs, die Projektarbeit und die konkrete Arbeitsorganisation entscheidend.

In beratender Funktion wird das Fraunhofer ISE von langjährigen Begleitern und erfahrenen Experten der Solarbranche unterstützt: Prof. Dr. Adolf Goetzberger (Institutsgründer und Institutsleiter 1981–1993), Prof. Dr. Joachim Luther (Institutsleiter 1993–2006) und Prof. Dr. Volker Wittwer (stellvertretender Institutsleiter 1997–2009).

INSTITUTSLEITUNG

Prof. Dr. Eicke R. Weber +49 761 4588-5121

STELLVERTRETENDE INSTITUTSLEITUNG

Dr. Andreas Bett +49 761 4588-5257

Prof. Dr. Hans-Martin Henning +49 761 4588-5134

KAUFMÄNNISCHER DIREKTOR

Dr. Holger Schroeter +49 761 4588-5668

PRESSE UND PUBLIC RELATIONS

Karin Schneider M. A. +49 761 4588-5147

STRATEGIEPLANUNG

Dr. Thomas Schlegl +49 761 4588-5473

ENERGIEPOLITIK

Dipl.-Phys. Gerhard Stryi-Hipp +49 761 4588-5686

KOORDINATION PHOTOVOLTAIK

Prof. Dr. Gerhard Willeke +49 761 4588-5266

KOORDINATION UNIVERSITÄTEN

Prof. Dr. Roland Schindler +49 761 4588-5252



1 Die Institutsleitung des Fraunhofer ISE (v. l. n. r.): Dr. Holger Schroeter, kaufmännischer Direktor, Prof. Dr. Hans-Martin Henning, stellvertretender Institutsleiter und Bereichsleiter »Thermische Anlagen und Gebäudetechnik«, Prof. Dr. Eicke R. Weber, Institutsleiter, Dr. Andreas Bett, stellvertretender Institutsleiter und Bereichsleiter »Materialien – Solarzellen und Technologie«.

2 Karin Schneider, Leiterin »Presse und Public Relations«.

3/4 Die wissenschaftlichen Bereichsleiter des Fraunhofer ISE (v. l. n. r.):

Dr. Werner Platzer »Solarthermie und Optik«, Dr. Günther Ebert »Elektrische Energiesysteme«, Dr. Christopher Hebling »Energietechnik«, Prof. Dr. Hans-Martin Henning »Thermische Anlagen und Gebäudetechnik«, Dr. Harry Wirth »Photovoltaische Module, Systeme und Zuverlässigkeit«, Dr. Andreas Bett »Materialien – Solarzellen und Technologie«, Dr. Ralf Preu »PV-Produktionstechnologie und Qualitätssicherung«, Dr. Stefan Glunz »Solarzellen – Entwicklung und Charakterisierung«.

WISSENSCHAFTLICHE BEREICHE

Thermische Anlagen und Gebäudetechnik	Prof. Dr. Hans-Martin Henning	+49 761 4588-5134
Solarthermie und Optik	Dr. Werner Platzer	+49 761 4588-5983
Materialien – Solarzellen und Technologie	Dr. Andreas Bett	+49 761 4588-5257
Solarzellen – Entwicklung und Charakterisierung	Dr. Stefan Glunz	+49 761 4588-5191
PV-Produktionstechnologie und Qualitätssicherung	Dr. Ralf Preu	+49 761 4588-5260
Photovoltaische Module, Systeme und Zuverlässigkeit	Dr. Harry Wirth	+49 761 4588-5858
Elektrische Energiesysteme	Dr. Günther Ebert	+49 761 4588-5229
Energietechnik	Dr. Christopher Hebling	+49 761 4588-5195

DAS INSTITUT IM PROFIL

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE setzt sich für ein nachhaltiges, wirtschaftliches, sicheres und sozial gerechtes Energieversorgungssystem ein. Es schafft technische Voraussetzungen für eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung, sowohl in Industrie- als auch in Schwellen- und Entwicklungsländern. Mit den Forschungsschwerpunkten Energiegewinnung, Energieeffizienz, Energieverteilung und Energiespeicherung entwickelt das Institut Materialien, Komponenten, Systeme und Verfahren in zwölf Geschäftsfeldern. Dabei kommen wissenschaftliche Expertise, Methoden und Geräte aus elf Kompetenzfeldern zum Einsatz. In Ergänzung zu Forschung und Entwicklung bietet das Fraunhofer ISE Prüf- und Zertifizierungsverfahren an. Das Institut ist nach DIN EN ISO 9001:2008 zertifiziert.

Forschungs- und Dienstleistungsangebot

Das Fraunhofer ISE ist Mitglied der Fraunhofer-Gesellschaft, der führenden Organisation für angewandte Forschung in Europa. Das Institut finanziert sich zu 90 Prozent durch Aufträge in den Bereichen angewandte Forschung, Entwicklung und Hochtechnologie-Dienstleistungen. Das Fraunhofer ISE ist in nationale und internationale Kooperationen wie Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) und European Renewable Energy Research Centres (EUREC) Agency eingebunden.

Vernetzung in der Fraunhofer-Gesellschaft

- Fraunhofer-Allianzen Energie, Batterien, Bau, Nanotechnologie, SysWasser
- Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität
- Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS
- Fraunhofer-Netzwerke Elektrochemie, Energiespeichersysteme und Netze, Intelligente Energienetze, Nachhaltigkeit, Windenergie
- »Morgenstadt-Initiative« der Fraunhofer-Gesellschaft

Außenstandorte und Kooperationen

Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen LSC

Das 2001 durch die Initiative und mit Unterstützung der Landesregierung Nordrhein-Westfalen entstandene Fraunhofer ISE Labor- und Servicecenter LSC ist spezialisiert auf produktionsnahe Prozessentwicklung zur Herstellung von Silicium-Dünnschichtsolarzellen, von Silicium-Heterosolarzellen und multikristallinen Siliciumsolarzellen. Es verfügt über zwei hervorragend ausgestattete Technologiebereiche und über umfangreiche Messtechnik zur Charakterisierung von Schichten und Solarzellen.

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP

Das Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP in Halle/Saale wurde gemeinsam von dem Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg und Halle, und dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE gegründet. Zentrale Einrichtungen sind der Bereich »Zuverlässigkeit und Technologien für Netzparität« (CSP-ZTN) und das »Labor für Kristallisationstechnologie« (CSP-LKT). Letzteres bildet – gemeinsam mit dem Silicon Materials Technology and Evaluation Center SIMTEC am Fraunhofer ISE in Freiburg – eine umfassende Technologieplattform für industrierelevante Kristallisationsprozesse, unter Verwendung produktionsnaher Anlagen, die über den Stand der Technik hinausweisen (Seite 30).

Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM

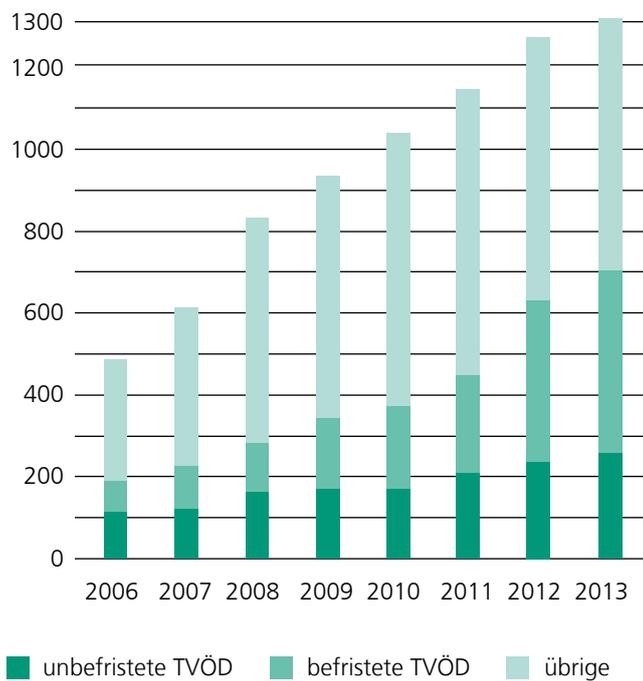
Das Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM in Freiberg, Sachsen, ist eine Kooperation des Fraunhofer ISE mit dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB, Erlangen. Das THM unterstützt Firmen

bei der Forschung und Entwicklung zur Materialpräparation und -bearbeitung für 300-mm-Silicium, Solarsilicium und III-V-Halbleiter. Ergänzend bietet es Dienstleistungen im Bereich Analytik, Charakterisierung und Test an.

Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE
Das Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE, 2008 in Boston aus der Kooperation des Fraunhofer ISE mit

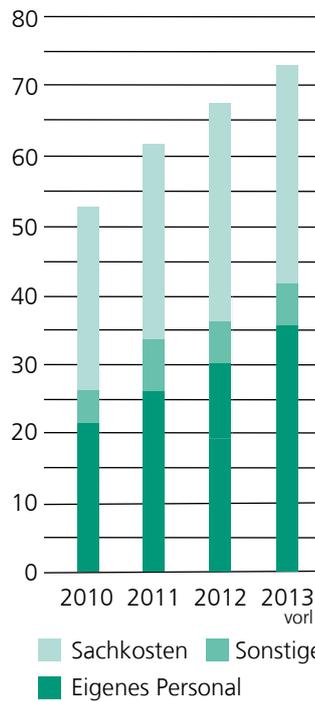
dem Massachusetts Institute of Technology MIT entstanden, trägt dazu bei, in Europa etabliertes Know-how und Technologien im Bereich erneuerbarer Energien für den amerikanischen Markt weiterzuentwickeln und dort einzuführen. 2010 startete das Fraunhofer CSE gemeinsam mit der Canadian Standards Association CSA sowie dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut ein Testzentrum für PV-Module, das CFV Solar Test Laboratory, in Albuquerque, New Mexico.

Personal

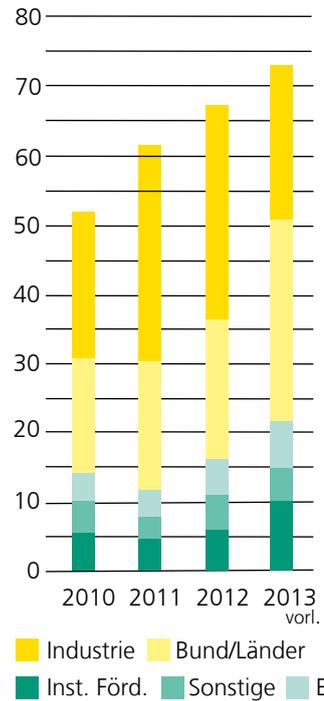


Am 31.12.2013 waren am Fraunhofer ISE insgesamt 1301 Mitarbeiter beschäftigt. Davon unterstützen 165 Promovierende, 135 Diplomanden, 44 Praktikanten, 291 wissenschaftliche Hilfskräfte sowie weitere 114 Mitarbeiter (z. B. Gastwissenschaftler) die Arbeit in den Forschungsprojekten und tragen wesentlich zu den wissenschaftlichen Ergebnissen bei.

Kosten Mio €



Erträge Mio €



Die Finanzstruktur der Fraunhofer-Gesellschaft unterscheidet zwischen dem Betriebs- und dem Investitionshaushalt. Der Betriebshaushalt umfasst alle Personal- und Sachaufwendungen sowie deren Finanzierung durch externe Erträge und institutionelle Förderungen. Unser Betriebshaushalt beträgt 73,1 Millionen Euro. Zusätzlich zu den in der Grafik angegebenen Ausgaben tätigte das Fraunhofer ISE im Jahr 2013 Investitionen in Höhe von 13,3 Millionen Euro (ohne Bauinvestitionen und Konjunkturprogramme).

NEUE AUSSENDARSTELLUNG IN 12 GESCHÄFTSFELDERN

Mit der zunehmenden Bedeutung der Energiewende hat sich das bereits seit seiner Gründung breit aufgestellte Themenportfolio des Fraunhofer ISE mit seinem systemischen Ansatz als zukunftsweisend bestätigt. Themen, die in langjähriger Interaktion mit der Industrie und der öffentlichen Auftragsforschung am Fraunhofer ISE bearbeitet wurden, sind durch die politische Entscheidung zur Umsetzung der Energiewende noch stärker gefordert und nachgefragt. Um Kunden und Projektpartner aus der Industrie – national wie international – sowie öffentliche Zuwendungsgeber, aber auch Politik, Öffentlichkeit und Medien und nicht zuletzt Partner aus der Wissenschaft noch gezielter anzusprechen, hat das Institut seine Außen- darstellung neu aufgestellt. So ist beispielweise die Forschung zu Speichertechnologien, zu Netzen, zur Leistungselektronik, zur Mobilität sowie zu Systemanalysen in den nunmehr zwölf Geschäftsfeldern deutlicher in den Fokus gerückt. Zudem erleichtert ein neuer Zugang über Kompetenzfelder das Auffinden von FuE- sowie Serviceleistungen für Interessenten nicht nur aus der Energiebranche.

Die zentralen Forschungsschwerpunkte erstrecken sich über die Bandbreite der Themen **Energieeffizienz, Energiegewinnung, Energieverteilung** und **Energiespeicherung**. Die zwölf Geschäftsfelder des Fraunhofer ISE sind das Schauen- fenster zu den FuE-Leistungen.

Im Kontext der Energieeffizienz hat das **Geschäftsfeld Energieeffiziente Gebäude** eine zentrale Bedeutung. Mehr als 40% des Endenergiebedarfs entfallen in Deutschland auf den Gebäudesektor. Für Wohnungsbau und Nichtwohngebäude, sowohl im Neubau als auch im Gebäudebestand, erarbeitet das Fraunhofer ISE Lösungen – von der Materialforschung bis zu Energieversorgungskonzepten. Über das Einzelgebäude hinaus nehmen hierbei Lösungsansätze für Quartiere und ganze Städte einen wachsenden Stellenwert ein (Seite 16 ff.).

Im **Geschäftsfeld Silicium-Photovoltaik** ist das Ziel, gemeinsam mit der Industrie neue Produkte zur Marktreife zu entwickeln und die Stromgestehungskosten für diese marktbeherrschende PV-Technologie durch Senkung der Produktionskosten und Steigerung des Wirkungsgrads weiter zu reduzieren. Die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit der PV-Industrie in Deutschland und Europa ist dabei ein zentrales Anliegen. Das Fraunhofer ISE bildet die gesamte Wertschöpfungskette der kristallinen Silicium-Photovoltaik ab, von der Kristallisation bis zur Modultechnologie (Seite 24 ff.).

Für hocheffiziente Photovoltaikkraftwerke und für Weltraum- anwendungen spielt das **Geschäftsfeld III-V- und Konzentrator-Photovoltaik** eine bedeutende Rolle. Für Satelliten werden hocheffiziente und leichte Mehrfachsolarzellen aus III-V Halbleitern eingesetzt. Diese Mehrfachsolarzellen, aber auch spezielle Siliciumsolarzellen, werden in Konzentrator- kraftwerken in sonnenreichen Regionen genutzt und erzielen dort geringere Stromgestehungskosten (Seite 46 ff.).

Weitere PV-Technologien werden im **Geschäftsfeld Farbstoff-, Organische und Neuartige Solarzellen** entwickelt. Kostensenkung durch den Einsatz neuer Materialien und Herstellungsprozesse sowie ein verbessertes Photonen- management sind die zentralen Themen. Farbstoffsolarmodule zielen dabei auf die Anwendung in der Architektur, Organische Solarzellen aufgrund ihrer Flexibilität auch auf ganz neue Einsatzbereiche (Seite 54 ff.).

Im **Geschäftsfeld Photovoltaische Module und Kraftwerke** liegt der Fokus auf Effizienz und Zuverlässigkeit. Hier entwickeln wir Modultechnologie für neue Zellgenerationen und erproben innovative Materialien. Ihre Gebrauchsdauer wird über die Analyse von Umwelt und Degradation sowie umfassende Prüfungen untersucht. Wir charakterisieren Module verschiedener PV-Technologien mit höchster Präzision, schließlich analysieren und optimieren wir den Ertrag von PV-Kraftwerken (Seite 62 ff.).



Der Solarwärme kommt bei der Umstellung unserer Energiesysteme eine zentrale Rolle zu. Das **Geschäftsfeld Solarthermie** umfasst den gesamten Markt von Nieder- bis Hochtemperaturanwendungen, von Brauchwasser- und Solarheizungsanlagen über Kühlung und Kälteerzeugung bis hin zur Komponenten- und Systementwicklung für solarthermische Großkraftwerke. Auch solare Prozesswärme für industrielle Anwendungen und die dezentrale Wasseraufbereitung zählen zu den Forschungsschwerpunkten (Seite 74 ff.).

Mit zunehmendem Anteil erneuerbarer Energien im Netz gewinnt Wasserstoff als Energiespeicher und Kraftstoff immer mehr an Bedeutung. Im **Geschäftsfeld Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie** forschen wir an innovativen Technologien zur Wasserstoffherzeugung durch die Wasserelektrolyse sowie aus biogenen Energieträgern, ebenso wie an der effizienten Umwandlung von Wasserstoff in Strom und Wärme durch PEM-Brennstoffzellen. Auf Grund unseres langjährigen verfahrens- und prozesstechnischen Know-hows, sowie der Katalyse haben wir unsere Aktivitäten auch auf nicht-energetische (stoffliche) Anwendungen und die emissionsarme Verbrennung erweitert (Seite 88 ff.).

Um die Vernetzung und Integration verschiedener Energiesysteme mit modernen Netzinfrastrukturen geht es im **Geschäftsfeld Systemintegration und Netze – Strom, Wärme, Gas**. »Smart Grid«, intelligente Betriebsführung von dezentralen Erzeugern und spartenübergreifenden Speichern in Wärme- Strom- und Gasnetzen sind zentrale Themen. Der Schwerpunkt bezieht sich auf dezentrale und regional vernetzte Energiesysteme im Kontext der Transformation des gesamten Energiesystems. Die kommunalen Konzepte beziehen sich im Besonderen auf die Smart Energy Cities, die in der Fraunhofer Initiative »Morgenstadt« bearbeitet werden (Seite 94 ff.).

Eine zentrale Bedeutung für unser zukünftiges Energiesystem, aber auch für Anwendungen in der Elektromobilität oder Luftfahrt, kommt leistungselektronischen Komponenten und Systemen zu. Hierfür bieten wir im **Geschäftsfeld**

1 / 2 *Hauptgebäude und Laborggebäude R des Fraunhofer ISE in Freiburg.*

Energieeffiziente Leistungselektronik eine breite Palette von FuE-Dienstleistungen bis hin zur Serienentwicklung an. Schwerpunkte sind neben der Steigerung der Energieeffizienz und der Integration von neuen Funktionen die Reduzierung von Bauvolumen und Gewicht sowie die Senkung der Herstellkosten von Wechsel- und Umrichtern, Wandlern und Steuer- und Regelsystemen (Seite 102 ff.).

Das **Geschäftsfeld Emissionsfreie Mobilität** greift die Forschungsdienstleistungen zur Bereitstellung der Antriebsenergie sowie zur Infrastruktur einer nachhaltigen Mobilität im Rahmen der Energiewende auf. Dabei stehen rein batteriebetriebene Fahrzeuge ebenso im Fokus wie Brennstoffzellenfahrzeuge. Das Institut charakterisiert und entwickelt Systeme und Komponenten rund um den Antrieb und die Fahrzeug-Netzchnittstelle und verfügt über eine öffentlich zugängliche Wasserstofftankstelle als Forschungsplattform (Seite 108 ff.).

Speichertechnologien für unterschiedliche Energieformen wie Strom und Wärme zählen seit seiner Gründung zu den Forschungsthemen des Fraunhofer ISE. Heute erstrecken sich die FuE-Leistungen im **Geschäftsfeld Speichertechnologien** von Lithium-Ionen- und Redox-Flow-Batterien über Elektrolyse und Wasserstofftechnologie bis hin zu Speichern für solarthermische Kraftwerke und Phasenwechselmaterialien in intelligenten Baustoffen und Kältespeichern (Seite 114 ff.).

Der weltweit wachsende Anteil der erneuerbaren Energien an der Energieversorgung wirft neue Forschungsfragen auf. So widmet sich das Fraunhofer ISE im **Geschäftsfeld Energiesystemanalyse** dezidiert neben Kosten- und Technologieanalysen auch den Fragestellungen nach der kosteneffizienten Nutzung erneuerbarer Energieressourcen, der optimierten Kombination unterschiedlicher Technologien im Energiesystem und der Weiterentwicklung des Energiesystems als Gesamtheit (Seite 122 ff.).



© Ryan Carter / Crown Prince Court – Abu Dhabi

1 Zayed Future Energy Prize 2014 für Fraunhofer ISE: Prof. Eicke R. Weber (li.), Scheich Mohammed Bin Zayed Al Nahyan (re.).

PREISE UND EHRUNGEN

Dirk Kranzer M. Eng.

3. Posterpreis für »Trafolosen einphasigen Modulwechselrichter mit SiC-Transistoren«, Ostbayerisches Technologie-Transfer-Institut e. V. (OTTI) beim 28. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 6.–8.3.2013, Bad Staffelstein

Dr. Olivier Stalter, Florian Reiners, Michael Eberlin, Sebastian Franz mit Frank Seybold von KACO new energy GmbH SEMIKRON Innovationspreis für »Neue Leistungselektronik für die vollständige Dorfstromversorgung in Entwicklungs- und Schwellenländern«, SEMIKRON-Stiftung bei PCIM Europe 2013, 10.6.2013 in Nürnberg

Prof. Dr. Eicke R. Weber

Einstein Award der SolarWorld für Engagement für die europäische Solarforschung, SolarWorld AG bei Intersolar Europe 2013, 20.6.2013, München

Dr. Pierre Saint-Cast

Junior Einstein Award von SolarWorld für Entwicklung einer neuartigen Passivierungsmethode für Siliciumsolarzellen, SolarWorld AG bei Intersolar Europe 2013, 20.6.2013, München

Stefan Fischer

Best Student Presentation Award in der Kategorie »Area 1 – Fundamentals and New Concepts« für »Effizienzsteigerungen von Siliciumsolarzellen durch Hochkonversion«, IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 21.6.2013, Tampa, Florida, USA

Dr.-Ing. Bruno Bueno

Best Paper Award 2013 für »The Urban Weather Generator«, Journal of Building Performance Simulation, 27.8.2013

Subarna Sapkota M. Sc.

Nepalesische Bildungsmedaille (Nepal Vidhya Bhusan Padak »Kha«) für beste Abschlussnote im Masterstudiengang »Renewable Energy Management« an der Universität Freiburg Nationaler Tages der Bildung, 8.9.2013, Kathmandu, Nepal

Florian Schindler

Poster Award für »Material Limitations due to Crucible Impurities in Multicrystalline Silicon for High Efficiency Solar Cells«, 28th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EUPVSEC), 30.9.–4.10.2013, Paris, Frankreich

Dipl.-Ing. Marek Miara

Auszeichnung für Engagement für die Entwicklung der Wärmepumpentechnologie in Polen, Polnischer Wärmepumpenverband beim II. Wärmepumpen Kongresses PORT PC, 16.–17.10.2013, Warschau, Polen

Dr. Martin Schubert

Ulrich Gösele Young Scientist Award 2013 für Forschungsarbeiten zu Messung, Simulation und Herkunft von Verunreinigungen in multikristallinem Silicium, Crystalline Silicon Solar Cells Conference (CSSC-7), 23.10.2013, Fukuoka, Japan

Dr. Simon Schwunk

Förderpreis für herausragende Promotionen für »Partikelfilter zur Ladezustands- und Alterungsbestimmung bei Lithium-Ionen-Batterien auf Basis von Metalloxiden und Phosphorolivinen«, FernUniversität Hagen, 15.11.2013

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE

Zayed Future Energy Prize 2014 in der Kategorie Nongovernmental Organization (NGO) dotiert mit 1,5 Millionen US-Dollar, überreicht durch Scheich Mohammed Bin Zayed Al Nahyan, Kronprinz von Abu Dhabi, World Future Energy Summit, 20.1.2014, Abu Dhabi, VAE

KURATORIUM

VORSITZENDER

Dr. Carsten Voigtländer

Vaillant Group Deutschland GmbH & Co. KG, Remscheid

STELLVERTRETENDER VORSITZENDER

Dr. Hubert Aulich

SolarValley Mitteldeutschland, Erfurt

MITGLIEDER

Dr. Nikolaus Benz

Schott Solar CSP GmbH, Mainz

Dr. Claudia Loy

Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt

Dr. Klaus Bonhoff

NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff und Brennstoffzellentechnologie, Berlin

Dr. Georg Menzen

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bonn

Regierungsdirektorin Kerstin Deller

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin

Dr. Dirk-Holger Neuhaus

SolarWorld Innovations GmbH, Freiberg

Hans-Josef Fell

bis Oktober 2013 Mitglied im Deutschen Bundestag, Berlin

Dr.-Ing. Norbert Pralle

Züblin AG, Stuttgart

Ministerialrat Stefan Gloger

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, Stuttgart

Dr. Klaus-Dieter Rasch

AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn

Dr. Winfried Hoffmann

Berater Applied Solar Expertise
President EPIA, Brüssel

Prof. Dr. Frithjof Staiß

Zentrum für Sonnenenergie und Wasserstoff-Forschung (ZSW), Stuttgart

Dipl.-Ing. Helmut Jäger

Solvis GmbH & Co. KG, Braunschweig

Dr. Norbert Verweyen

RWE Effizienz GmbH, Dortmund

Dipl.-Ing. Wilfried Jäger

VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Offenbach

Prof. Andreas Wagner

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft,
Baden-Württemberg, Stuttgart

Das Kuratorium begutachtet die Forschungsprojekte und berät die Institutsleitung und den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft bezüglich des Arbeitsprogramms des Fraunhofer ISE (Stand: 31. Dezember 2013).

ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE



Mehr als 40% des Endenergiebedarfs in Deutschland entfallen auf den Gebäudesektor. Ähnliche Zahlen gelten in Europa und in den meisten industrialisierten Ländern. Der überwiegende Anteil an Energie wird dabei für ein angenehmes Raumklima – Heizen, Kühlen, Lüften, Entfeuchten, Befeuchten – sowie für Warmwasserbereitung und künstliche Beleuchtung benötigt. Hierfür werden überwiegend fossile Brennstoffe – im Wesentlichen Erdgas und Heizöl – verwendet, deren Verbrennung mit der Emission von Treibhausgasen verbunden ist. Dem Gebäudesektor kommt insofern eine zentrale Rolle bei der Erreichung von Klimaschutzziele zu.

Die Bundesregierung hat sich zum Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 einen klimaneutralen Gebäudebestand zu erreichen. In der Europäischen Union müssen ab 2021 alle Neubauten – öffentliche Neubauten bereits ab 2019 – Niedrigstenergiegebäude sein; dies erfordert im Jahresmittel eine nahezu ausgeglichene Energiebilanz. Die Reduktion des Energiebedarfs von Gebäuden und die Deckung des verbleibenden Bedarfs durch erneuerbare Energien sind deshalb zentrale Anforderungen.

Energieeffiziente Gebäude sind ein zentrales Geschäftsfeld des Fraunhofer ISE. Unsere Arbeiten umfassen alle wesentlichen Bereiche der Energieeffizienz und der Nutzung erneuerbarer Energien in Gebäuden – sei es für Wohnungsbauten oder Nichtwohngebäude, sei es für Neubauten oder Bestandsgebäude. Zudem adressieren unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in wachsendem Umfang über das Einzelgebäude hinaus gehende Lösungsansätze, beispielsweise für Quartiere, die durch Wärmenetze erschlossen werden, oder für ganze Städte, für die wir auf Basis detaillierter Simulationen Maßnahmen vorschlagen, um sie bei der konkreten Umsetzung von Klimaschutzkonzepten zu unterstützen.

Die Gebäudehülle ist der wichtigste Ansatzpunkt zur Reduktion des Energieverbrauchs. Unsere Arbeiten reichen von der Materialforschung für opake und transparente Bauteile über die Entwicklung von Fassadenkonzepten bis hin zur Qualitätssicherung bei der Begleitung innovativer Gebäudekonzepte. Neben der Optimierung der Tageslichtnutzung bei hohem visuellem Komfort spielt zunehmend auch die Integration aktiver Komponenten zur Wandlung von Solarenergie in Wärme und Strom eine wichtige Rolle.

Anlagen der technischen Gebäudeausrüstung bergen ein hohes Potenzial, den Primärenergieeinsatz zu reduzieren und ermöglichen die Integration erneuerbarer Energien. Wir ar-

beiten an allen relevanten Technologien zur Bereitstellung von Wärme, Kälte und Strom im Gebäude. Dies schließt Speicher für erneuerbare Energien und Lastmanagement ebenso ein wie die Einbindung von Umweltwärmequellen bzw. -senken und optimierte Übergabesysteme im Raum. Ein Schwerpunkt unserer Arbeiten betrifft sowohl elektrische als auch gasbetriebene Wärmepumpen, die eine Schlüsseltechnologie für ein auf erneuerbaren Energien basierendes Energiesystem darstellen. Breit angelegtes Monitoring von technischen Anlagen und ganzen Gebäuden ist ein wichtiges Instrument der Qualitätssicherung und der Identifikation von Optimierungspotenzialen. Wir haben umfassende Erfahrungen in der Durchführung von Monitoring-Kampagnen aufgebaut und leistungsfähige Werkzeuge im Bereich der Messtechnik sowie der standardisierten Auswertung, Visualisierung und Fehleridentifikation entwickelt.

Gebäude und ihre versorgungstechnischen Anlagen sind komplexe Systeme. Modernen Betriebsführungskonzepten kommt deshalb eine zentrale Rolle zu, um ein Maximum an Komfort bei einem Minimum an Energieaufwand im praktischen Betrieb sicherzustellen. Dazu kommt, dass Gebäude und gebäudetechnische Anlagen zukünftig höhere Anforderungen aus dem Betrieb des Stromnetzes im Sinne eines netzdienlichen Betriebs erfüllen müssen. Hier entwickeln wir sowohl Software-Lösungen als auch Hardware-Komponenten, die ein flexibles Energiemanagement im Netzverbund ermöglichen.

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt 113

Mitarbeiter vollzeitäquivalent 97

Zeitschriften- und Buchbeiträge 38

Vorträge und Konferenzbeiträge 56

www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/10



Laborneubau Fraunhofer ISE: Seminarraum mit bauwerksintegrierter Photovoltaik (BIPV) – teil-transparente PV-Module mit winkelselektiver Transmission (PV Shade®).

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination	Prof. Dr. Hans-Martin Henning	Telefon +49 761 4588-5134 building@ise.fraunhofer.de
Energiekonzepte für Gebäude	Dipl.-Ing. Sebastian Herkel	Telefon +49 761 4588-5117 building.concepts@ise.fraunhofer.de
Smart Home Technologien	Dr.-Ing. Christof Wittwer	Telefon +49 761 4588-5115 building.smarthome@ise.fraunhofer.de
Betriebsführung von Gebäuden	Dipl.-Ing. Nicolas Réhault	Telefon +49 761 4588-5352 building.control@ise.fraunhofer.de
Fassaden und Fenster	Dipl.-Phys. Tilmann Kuhn	Telefon +49 761 4588-5297 building.facades@ise.fraunhofer.de
Lichttechnik	Dr.-Ing. Bruno Bueno	Telefon +49 761 4588-5377 building.light@ise.fraunhofer.de
Elektrische und thermische Wärmepumpen	Dipl.-Ing. Marek Miara	Telefon +49 761 4588-5529 building.heatpumps@ise.fraunhofer.de
Wärmeübertragung in gebäudetechnischen Anlagen	Dr.-Ing. Lena Schnabel	Telefon +49 761 4588-5412 building.heattransfer@ise.fraunhofer.de
Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden	Dr.-Ing. Doreen Kalz	Telefon +49 761 4588-5403 building.cooling@ise.fraunhofer.de



LOWEX-VERSORGUNGSKONZEPT MIT INTEGRIERTEM KALTWASSERSPEICHER

Für den Laborneubau des Fraunhofer ISE in Freiburg wurde ein Wärme- und Kälteversorgungskonzept mit niedrigem Exergieinsatz entwickelt. Um den hohen Bedarf an Prozesskälte für Versuchs- und Produktionsanlagen zu decken, Lastschwankungen auszugleichen und damit die Versorgung zu sichern, wurde ein 500 m³ großer, unterirdischer Kaltwasser-Schichtspeicher in das Gebäude integriert. Die kurzzeitige Kaltwasserspeicherung reduziert die notwendige Kälteleistung, nutzt freie Kühlung über Außenluft und ermöglicht einen energetisch und wirtschaftlich effizienten Betrieb der Kälteerzeuger. Dabei waren bauphysikalische und anlagentechnische Probleme zu lösen.

Clemens Faller, Sebastian Herkel, **Doreen Kalz**,
Nicolas Réhault, Martin Sonntag, Alexander Urbanz,
Hans-Martin Henning

Im Zentrum des Energieversorgungskonzepts steht eine hocheffiziente Wärmepumpe mit magnetgelagerten Turboverdichtern, die gleichzeitig Wärme und Kälte bereit stellt und Prozessabwärme nutzt. Die Wärmepumpe ist kombiniert mit einem gebäudeintegrierten Kaltwasser-Schichtspeicher, der eine Doppelfunktion im Wärme- und Kälteversorgungskonzept hat. Im Heizbetrieb fungiert er als Wärmequelle für die Wärmepumpe. Im Kühlbetrieb dient er der Speicherung von Kälte sowie der Schaffung einer redundanten Kälteversorgung für die sensible Prozesstechnik des Laborgebäudes. Der Speicher wird primär durch Außenluft und durch das unter dem Speicher anstehende Erdreich und Grundwasser rückgekühlt. Nachts sinkt im Allgemeinen der Kältebedarf, die verfügbare Kälteleistung der Kältemaschine oder der Rückkühler wird dann für die Speicherbeladung genutzt. Der Kaltwasservorrat

1 *Unterirdischer, gebäudeintegrierter Kaltwasser-Schichtspeicher während der Bauphase.*

2 *Laborgebäude des Fraunhofer ISE. Die Wärme- und Kälteversorgung erfolgt mit niedrigem Exergieinsatz.*

kann zum Beispiel am nachfolgenden Tag für die Spitzenlastdeckung eingesetzt werden und so Bezugsspitzen im Netz reduzieren. Durch diese flexible Betriebsweise und das moderne Gebäudekonzept wird eine erhebliche Reduktion des Primärenergiebedarfs möglich.

Die Funktion des gesamten Systems hängt stark vom thermischen Schichtungsbetrieb im Speicher ab. Aufgrund der geringen Dichtedifferenzen des Wassers im Temperaturbereich von 16 bis 22 °C wurden die Be- und Entladeeinrichtungen sehr sorgfältig gestaltet. Von der Professur für Technische Thermodynamik der TU Chemnitz wurden dazu eigene Modelle entwickelt und unter anderem die Radialdiffusoren konzipiert, die Be- und Entladen in einer Schicht ohne Verwirbelung ermöglichen.

Um das Energiekonzept und die Performance der Anlagen zu überprüfen, führen wir ein Langzeit-Monitoring durch.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.

<http://lowexbestand.ise.fraunhofer.de>



1



2

© Rolf Ditsch SolarArchitektur

GEBÄUBEBETRIEB IN INTERAKTION MIT DEM ENERGIEVERSORGUNGSNETZ

Eine große Herausforderung der Energiewende ist der Wandel von einer derzeitigen zentralen hin zu einer – zumindest anteilig – dezentralen elektrischen Energieversorgung mit erneuerbaren Energien. Die zunehmend schwankende Einspeisung aus erneuerbaren Energien in das Stromnetz führt zu einer wachsenden Stromnetzbelastung, die ein effizientes Lastmanagement von Stromangebot und -nachfrage erfordert. Vor diesem Hintergrund bewerten wir, wie sich Gebäude als steuerbare Energieverbraucher und thermische Speicher in einem zukünftigen intelligenten Stromnetz verhalten und wie sie zur Netzstabilität beitragen können.

Sebastian Herkel, **Doreen Kalz**, Konstantin Klein, Andreas Palzer, Martin Sonntag, Simon Winiger, Hans-Martin Henning

Eine Reduktion des Energieverbrauchs in Gebäuden wird wesentlich durch bauliche Maßnahmen und effiziente Anlagen erreicht. Mit einem stetig wachsenden Anteil an erneuerbaren Energien im Stromnetz muss das Gebäude der Zukunft zusätzlich aber auch an die Bedürfnisse einer regenerativ dominierten Stromerzeugung angepasst werden. Damit steht das Energiesystem als Ganzes einschließlich aller Erzeugungseinheiten im Fokus. Wir entwickeln und testen angepasste Regelungs- und Betriebsführungskonzepte, die ein erhöhtes lokales Lastmanagement ermöglichen, indem der Betrieb von elektrischen Wärmepumpen und Kältemaschinen netzdienlich gestaltet wird. Für die Bewertung der Interaktion von Gebäuden und Stromnetz haben wir unterschiedliche stromnetzbezogene Größen im Hinblick auf ihre zeitliche Struktur, Schwankungsbreiten sowie tages- und jahreszeitlichen Besonderheiten untersucht. Dabei wird deutlich, dass der

- 1 *Solarsiedlung in Freiburg.*
- 2 *Kältespeicherung und -verteilung.*

Betrieb von elektrischen Wärmepumpen im Heizfall nach dem EEX-Preis und der Residuallast im Versorgungsnetz optimiert werden kann. Im Kühlfall lässt sich durch einen optimierten Betrieb von Kältemaschinen zu Zeiten mit hohen Anteilen regenerativen Stroms im Versorgungsnetz insbesondere der Primärenergiebezug reduzieren.

Darüber hinaus bewerten wir, wie die Lastverschiebung durch technische (Wasser-)Speicher im Gebäude und die thermische Masse der Gebäudestruktur realisiert werden kann. In aktuellen Arbeiten konnten wir nachweisen, dass heutige Bestandssysteme in Nichtwohngebäuden deutlich zu klein dimensioniert sind, um in der Heizperiode eine ausreichende Verschiebung der Betriebszeit zu ermöglichen. Weiterführende Arbeiten beschäftigen sich mit der optimalen Dimensionierung von technischen Speichern und deren Integration in Gebäude sowie der effizienten Aktivierung der thermischen Gebäudemasse zur Lastverschiebung.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.

www.netzreaktivegebaeude.de



FELDMESSUNGEN GROSSER WÄRMEPUMPEN

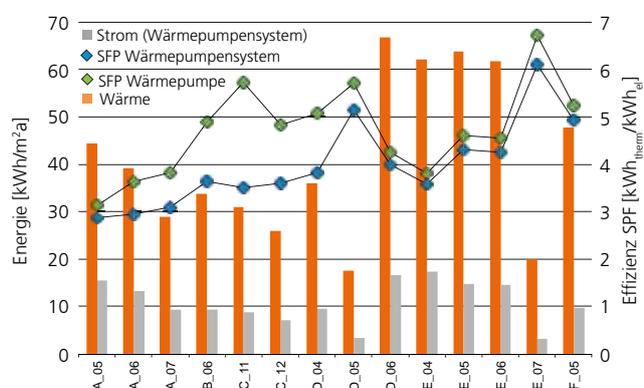
Analysen zur Zusammensetzung des zukünftigen Gesamtenergiesystems Deutschlands mit dem Ziel möglichst niedriger Gesamtkosten zeigen, dass elektrische Wärmepumpen eine zentrale Rolle bei der Wärmeversorgung spielen werden (Seite 127). Besonders Wärmepumpen in größerem Leistungsbereich für die Versorgung von Büro- und Gewerbegebäuden haben großes Potenzial durch eine abgestimmte Interaktion mit dem Versorgungsnetz Lastverschiebung durch das effiziente Erzeugen und Zwischenspeichern von Wärme und Kälte zu ermöglichen und damit einen Beitrag zur Netzstabilität zu leisten. Auf Basis von mehrjährigen Messkampagnen bewerten wir die Energie- und Effizienzperformance sowie das Betriebsverhalten großer Wärmepumpenanlagen mit einem thermischen Leistungsbereich von 40 bis 150 kW_{therm}.

Sebastian Herkel, **Doreen Kalz**, Martin Sonntag, Simon Winiger, Hans-Martin Henning

Niedrigenergiegebäude mit einem reduzierten Leistungs- und Energiebedarf für Heizung und Kühlung ermöglichen den effizienten Einsatz von natürlichen Umweltwärmequellen und -senken in Kombination mit Wärmepumpen. Im Winter wird das natürlich vorhandene Temperaturniveau der Umweltenergie durch eine Wärmepumpe noch geringfügig – und damit wirtschaftlich günstig – erhöht. Im Sommer wird das Erdreich bzw. das Grundwasser direkt als natürliche Umweltwärmesenke zur freien Kühlung der Gebäude genutzt. Erfordert das Gebäude und die Nutzung eine erhöhte Kühlleistung, kann Klimakälte durch eine reversible Wärmepumpe energieeffizient bereitgestellt werden.

Für die Wärmepumpenanlagen in den untersuchten Gebäuden (Wärmepumpe mit Verdichter und Primärpumpe) werden im Heizmodus Jahresarbeitszahlen von 3 bis 6,1 kWh_{therm}/kWh_{el}

1 Reversible Wärmepumpe mit Turboverdichtertechnologie.



2 Messtechnische Analyse von großen Wärmepumpensystemen in Nichtwohngebäuden: bereitgestellte Wärme, Strombezug der Wärmepumpensysteme, Energieeffizienz Wärmepumpe (nur Kompressor) und Energieeffizienz Wärmepumpensystem (Wärmepumpe und Primärkreis) (SPF = Seasonal Performance Factor, Jahresarbeitszahl).

(Erdreich) bzw. 3,0 kWh_{therm}/kWh_{el} (Grundwasser) erreicht. Sowohl die Primärpumpe als auch die Vorlauftemperatur des sekundärseitigen Übergabesystems haben einen entscheidenden Einfluss auf die Leistungs- und Jahresarbeitszahlen der Wärmepumpe. Die Nutzung von erdreichgekoppelten, reversiblen Wärmepumpen zur Kälteerzeugung stellt ein effizientes und nachhaltiges Konzept zur Gebäudekühlung dar. Auch hier bedingen die relativ hohen Vorlauftemperaturen zur Kühlung von 16 °C bis 20 °C gute Energieeffizienzen. Messtechnisch wurden in Projekten Jahresarbeitszahlen von 4,8 bis 5,8 kWh_{therm}/kWh_{el} nachgewiesen.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.

www.netzreaktivegebaeude.de



1



2

MODELLBASIERTE QUALITÄTSSICHERUNG DES GEBÄUDEBETRIEBS

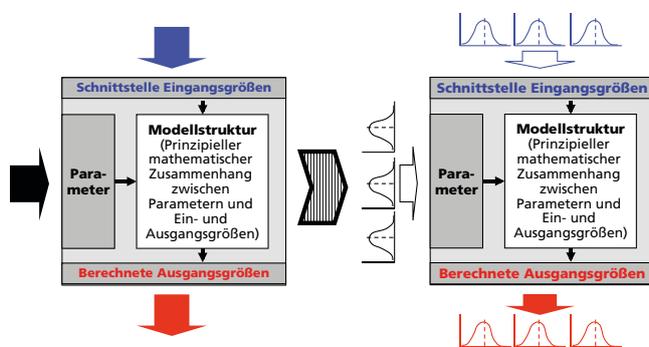
ModOS

Die Qualität einer gebäudetechnischen Versorgungsaufgabe ist gekennzeichnet durch einen hohen Komfort für den Nutzer des Gebäudes bei gleichzeitig minimalem Energieaufwand und einem Minimum der korrespondierenden Kosten. Im Rahmen des Projekts »ModQS – Modellbasierte Qualitätssicherung des Gebäudebetriebs« soll dieses Prinzip auf Basis eines systematisierten Ansatzes auf heizungstechnische Anlagen zur Wärmeversorgung in bestehenden Nichtwohngebäuden angewendet werden. Durch den Einsatz modellbasierter Fehlererkennungs-, Fehlerdiagnose- und Optimierungs-Verfahren können Einsparpotenziale erschlossen werden. Unsere Arbeiten zeigen, dass Einsparpotenziale ohne wesentliche Änderungen der Anlagentechnik zwischen 5 und 30% liegen.

Gesa Böhme, Sebastian Burhenne, Sebastian Herkel, Thorsten Müller, Felix Ohr, **Nicolas Réhault**, Tim Rist, Sebastian Zehnle, Hans-Martin Henning

1 Kreispolizeibehörde Mettmann: Ein modernes Gebäude mit hohem Fensterflächenanteil und thermo-aktiven Bauteilsystemen (TABS) zur Wärmeübergabe. Gebäude dieser Art stellen eine hohe Herausforderung für die Regelungstechnik dar. So kann es in der Übergangsjahreszeit zu überhöhten Raumtemperaturen kommen, beispielsweise wenn TABS für Heizzwecke beladen sind und hohe solare Lasten auftreten.

2 Bezirksregierung Düsseldorf: Bei Objekten älteren Baujahrs wird die Erstellung von Simulationsmodellen durch fehlende Daten zur Beschreibung des thermischen Verhaltens des Gebäudes erschwert. Abhilfe können vereinfachte Gebäudemodelle schaffen, die anhand von Messdaten kalibriert werden.

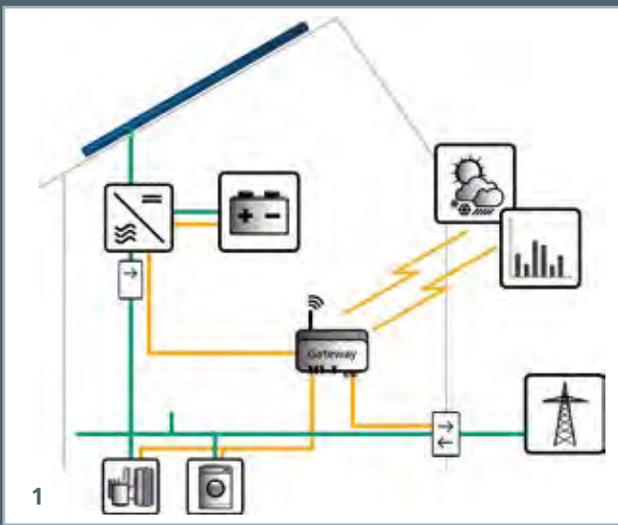


3 Vorgehen bei einer Simulation bzw. Optimierung unter unsicheren Randbedingungen. Parameter und Eingangsgrößen werden ganz oder teilweise als Wahrscheinlichkeitsverteilungen aufgeprägt. Das Ergebnis ist eine Wahrscheinlichkeitsverteilung der Ausgangsgrößen, die eine Bewertung eines Konzepts ermöglicht.

Gründe für den oftmals fehlerbehafteten und nicht optimalen Betrieb von Bestandsgebäuden sind in der Regel fehlende systematische Methoden zur Datenerfassung, Datenaufbereitung, Fehlererkennung, Fehlerdiagnose und Optimierung, die auch das Zusammenwirken verschiedener Subsysteme innerhalb einer komplexen gebäudetechnischen Struktur erfassen und zugleich unsichere Randbedingungen berücksichtigen (Abb. 3). Im Projekt »ModQS« werden modellbasierte Methoden im Bereich des Gebäudeenergiemanagements entwickelt, die Fehler automatisch erkennen und Betriebsoptimierungspotenziale unter unsicheren Randbedingungen aufzeigen sollen.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Rahmen des Programms »EnOB« bzw. »EnBOP« gefördert.

www.modqs.de



INNOVATIVE ENERGIEMANAGEMENTSYSTEME FÜR GEBÄUDE IM SMART GRID

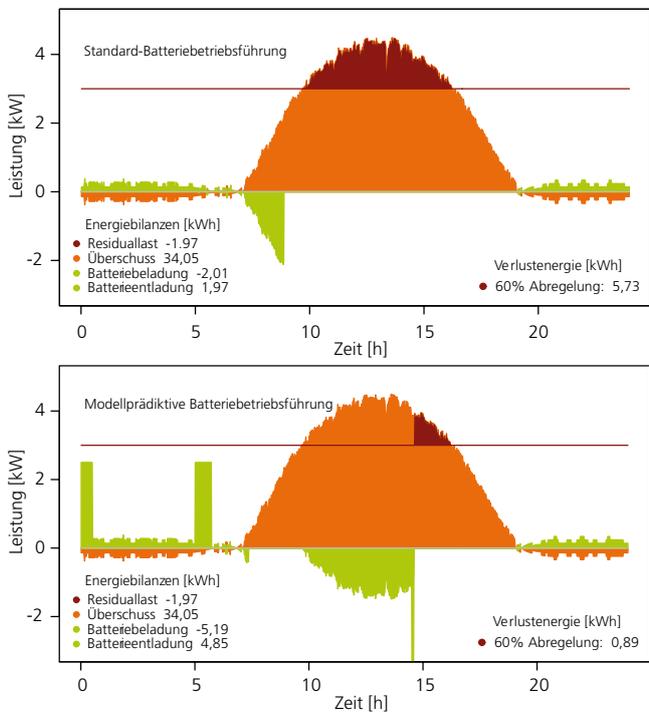
Dezentrale Energieerzeuger werden künftig höhere Anforderungen aus dem Netzbetrieb erfüllen und sich in Marktprozesse integrieren müssen. Zudem wird die lokale Optimierung eine wichtige Rolle spielen. Diese Aufgaben übernehmen Energiemanagementsysteme, die als zentrale Schnittstelle lokale Anlagen und übergeordnete Systeme vernetzen. Am Fraunhofer ISE arbeiten wir an offenen Energiemanagementplattformen, Treiberschnittstellen, Datenmodellen und prädiktiven Optimierungsalgorithmen. Ein aktuelles Beispiel ist die netzfreundliche Betriebsweise eines PV-Batteriesystems zur Reduzierung der PV-Einspeiseleistung um die Mittagszeit.

Felix Braam, Stefan Feuerhahn, **Robert Kohrs**,
Christof Wittwer, Michael Zillgith, Günther Ebert

Marktverfügbare PV-Batteriesysteme sollen den Eigenverbrauch maximieren. Als Führungsgröße reicht dazu die Leistung am Hausanschlusspunkt. Eine netzfreundliche Betriebsweise erfordert ein komplexeres Regelungssystem, das Prognosen von lokaler Erzeugung und Verbrauch, Batteriebeladung vorrangig in Leistungsspitzen und Vorbehalt entsprechender Batteriekapazitäten bietet. Die Datenerfassung und -aufbereitung sowie die Optimierung der Energieflüsse übernimmt das zentral im Haushalt vernetzte Energiemanagementsystem.

Im Projekt »Heiphoss« entwickeln wir entsprechende modellprädiktive Algorithmen. Die Laufzeitumgebung des Energiemanagement-Gateways bildet dabei das »OpenMUC«-Softwareframework. »OpenMUC« wird seit einigen Jahren am Fraunhofer ISE als quelloffenes System entwickelt. Es bietet mittlerweile eine Fülle von Anlagenschnittstellen einschließlich IEC 61850 und wird bereits in verschiedenen Projekten erfolgreich eingesetzt. Aus technischer Sicht muss

1 Smart Home Konzept mit zentralem Energiemanagementsystem.

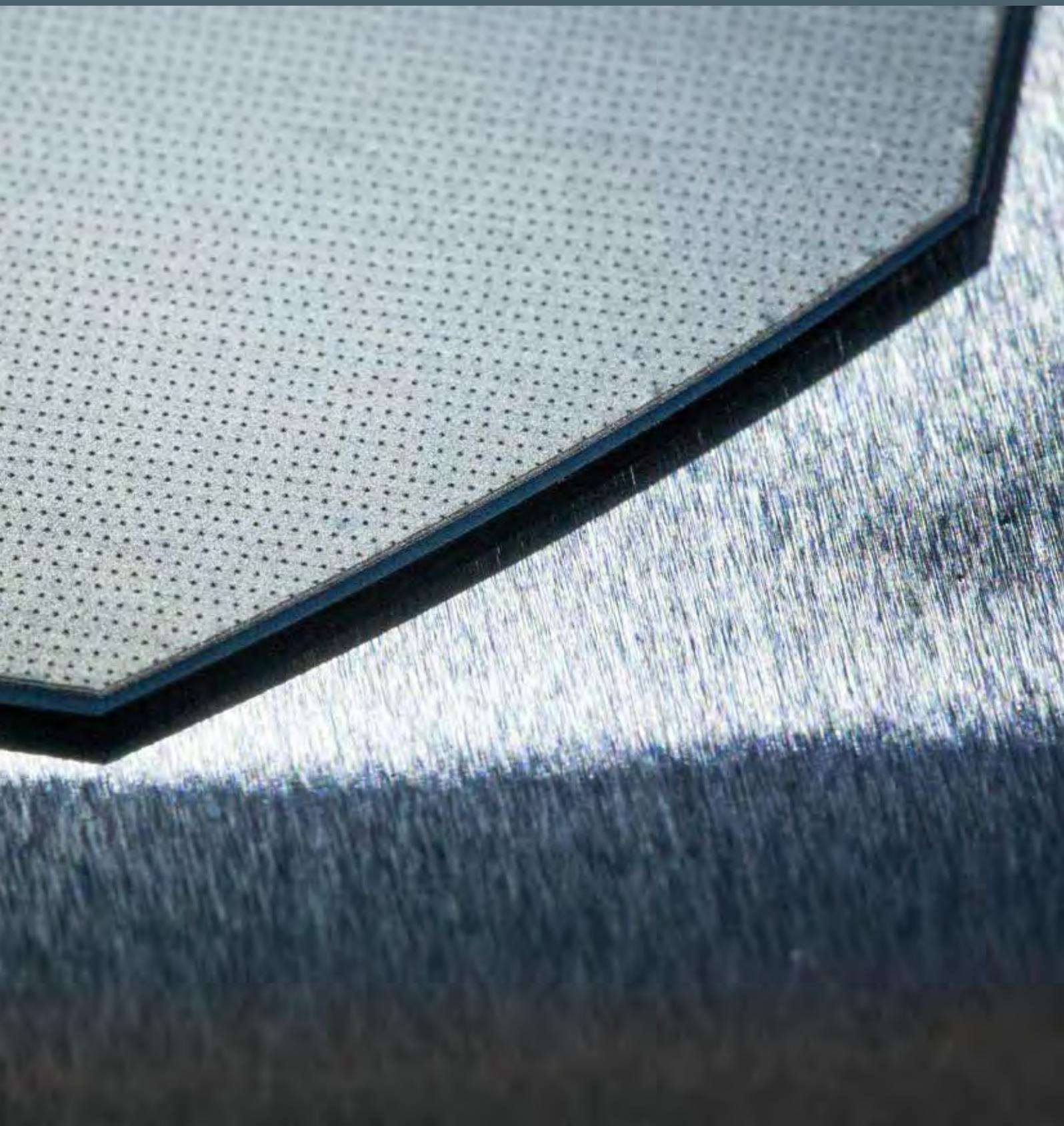


2 Erzeugungs- und Lastdaten eines typischen Privatgebäudes. Zur Pufferung der Leistungsspitze werden prognosebasierte Algorithmen entwickelt.

ein Energiemanagementsystem interoperabel, flexibel bei sich ändernden Rahmenbedingungen, sicher und energieeffizient sein. Im Projekt »Heiphoss« wird ein Prototyp des neuen Energiemanagementsystems in Privatgebäuden implementiert und im Jahr 2014 im Feldversuch evaluiert. Im Projekt »OGEMA 2.0« untersuchen und entwickeln wir weitergehende Ansätze für Energiemanagementsysteme wie Sicherheitskonzepte für mehrere Nutzer und abstrakte Datenmodelle.

Beide Projekte werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.

SILICIUM-PHOTOVOLTAIK



Rund 85% der hergestellten Solarzellen basieren auf kristallinem Silicium. Wirkungsgrad, Preis- / Leistungsverhältnis, Langzeitstabilität und Kostenreduktionspotenziale sprechen dafür, dass dieser Leistungsträger der terrestrischen Photovoltaik auch künftig marktbeherrschend sein wird. Unsere FuE-Angebote zielen darauf ab, gemeinsam mit der Industrie neue, innovative Produkte zur Marktreife zu führen. Ziel ist, die Herstellungskosten zu senken und so die Wettbewerbsfähigkeit der PV-Industrie in Deutschland und Europa zu stärken. Wir bilden dazu die gesamte Wertschöpfungskette der kristallinen Silicium-Photovoltaik ab.

Die PV-Materialplattform des Fraunhofer ISE mit dem Silicium Material Technologie und Evaluationscenter SIMTEC in Freiburg, dem Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM in Freiberg sowie dem Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP in Halle deckt alle Forschungsthemen von der Kristallisation bis zum Wafer ab. Die wissenschaftlichen Schwerpunkte unserer Arbeiten liegen in der Verbesserung des Kristallisationsprozesses hin zu höchsteffizienzfähigen Siliciumkristallen und der Herstellung dünnerer Wafer mit geringerem Schneideverlust. Für das Konzept der kristallinen Silicium-Dünnschichtsolarzelle entwickeln wir spezifische Anlagen und Prozesse. Arbeitsschwerpunkte sind Anlagen für Hochdurchsatz-Silicium-Abscheidung sowie angepasste Prozesse für Substrat-, Schicht- und Solarzellenherstellung.

Eine zentrale Aufgabe unseres ETALab® (ETA = Effizienz, Technologie, Analyse) ist die Entwicklung und Analyse von hocheffizienten Zellkonzepten und -prozessen. Mit kosteneffektiven Technologien wollen wir höhere Wirkungsgrade erzielen, um so die Voraussetzung für deutliche Kostensenkungen zu schaffen. Bei den Solarzellenkonzepten liegt unser Fokus auf rückseitig kontaktierten Zellen und Strukturen für n-Typ Silicium. Das ETALab® umfasst eine ausgezeichnete Prozessinfrastruktur im 500 m² großen Reinraumlabor. Damit war es uns möglich, mehrere internationale Rekordwirkungsgrade zu erzielen. Zudem stehen uns ca. 900 m² Einzellaborflächen zur Verfügung, um effektive Oberflächenpassivierungsschichten, neuartige Metallisierungs- und Dotierverfahren, innovative Nanostrukturierungstechnologien und neue Charakterisierungsmethoden zu entwickeln.

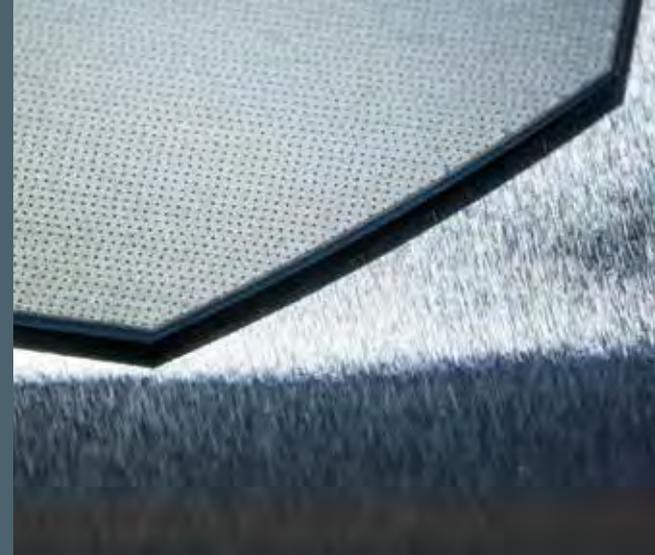
Im Photovoltaik-Technologie Evaluationscenter PV-TEC können wir auf über 1200 m² Technologiefläche im Pilotmaßstab – d. h. mit einem Durchsatz von mehr als 100 Wafern pro Stunde – sowohl Solarzellen mit industriell üblichen siebgedruckten Kontakten als auch mit hochwertiger Oberflächenpassivierung

und neuartiger Verschaltungsarchitektur herstellen. Für die verschiedenen Technologiebereiche stehen uns flexible halb-automatische und hochproduktive vollautomatische Anlagen für die Prozessentwicklung zur Verfügung. Alle Material- und Prozessdaten werden in einem zentralen Datenbanksystem erfasst und stellen so unsere hohen Qualitätsanforderungen sicher, die sich insbesondere auch zur Analyse neuer Materialien eignen. Unsere Leistungen reichen von der Entwicklung neuer Konzepte auf Pilotniveau über die Bewertung neuer Technologien bis zum Transfer in die Produktionslinien unserer Kooperationspartner.

Für alle genannten Technologieschwerpunkte bildet unser exzellenter Charakterisierungs- und Simulationspool die Grundlage für effektive und wissenschaftlich fundierte Entwicklungen. Wir sind maßgeblich an der Entwicklung neuer Charakterisierungsverfahren beteiligt, z. B. der bildgebenden Photolumineszenzmethode zur Analyse von Siliciummaterial und -zellen. Das Photovoltaik Modul-Technologiecenter MTC am Fraunhofer ISE ermöglicht die Verarbeitung neuer Zellen und Materialien in aussagekräftigen Stückzahlen und Formaten. Prozessschritte und Anlagentechnik für die Modulproduktion werden bis zur Vorstufe einer Serienfertigung entwickelt.

Unsere Aktivitäten im Bereich Siliciummaterial und -solarzellen am Standort Freiburg werden ergänzt durch das Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen LSC (Seite 10).

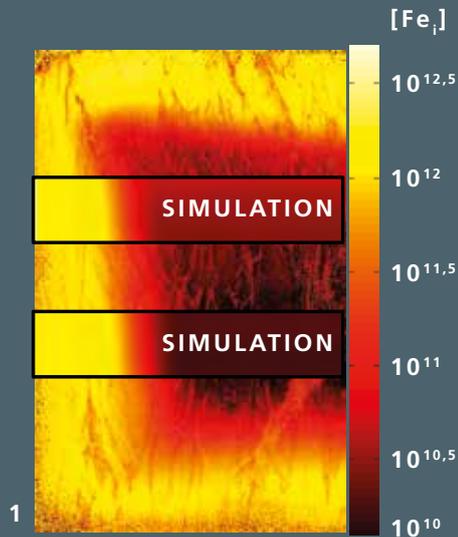




Mittels Aluminiumfolie metallisierte Siliciumsolarzelle.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination	Dr. Stefan Glunz Dr. Ralf Preu	Telefon +49 761 4588-0 sipv@ise.fraunhofer.de
Feedstock, Kristallisation und Wafering	Dr. Stefan Reber	Telefon +49 761 4588-5248 sipv.material@ise.fraunhofer.de
Kristalline Silicium-Dünnschichtsolarzellen	Dr. Stefan Janz	Telefon +49 761 4588-5261 sipv.csi-thinfilm@ise.fraunhofer.de
Charakterisierung von Prozess- und Silicium-Materialien	Dr. Wilhelm Warta	Telefon +49 761 4588-5192 sipv.characterization@ise.fraunhofer.de
Dotierung und Diffusion	Dr. Jan Benick	Telefon +49 761 4588-5020 sipv.doping@ise.fraunhofer.de
Oberflächen: Konditionierung, Passivierung, Lichteinfang	Dr. Jochen Rentsch	Telefon +49 761 4588-5199 sipv.surface@ise.fraunhofer.de
Kontaktierung und Strukturierung	Dr. Markus Glatthaar	Telefon +49 761 4588-5918 sipv.contact@ise.fraunhofer.de
Herstellung und Analyse von hocheffizienten Solarzellen	Dr. Martin Hermle	Telefon +49 761 4588-5265 sipv.hieta@ise.fraunhofer.de
Pilotherstellung von industrienahen Solarzellen	Dr. Daniel Biro	Telefon +49 761 4588-5246 sipv.pilot@ise.fraunhofer.de
Messtechnik und Produktionskontrolle	Dr. Stefan Rein	Telefon +49 761 4588-5271 sipv.metrology@ise.fraunhofer.de
Modulintegration	Dr. Ulrich Eitner	Telefon +49 761 4588-5825 sipv.module@ise.fraunhofer.de
Amorphe Silicium-Stapelsolarzellen	Dr. Dietmar Borchert	Telefon +49 209 15539-13 sipv.asi-thinfilm@ise.fraunhofer.de
Technologiebewertung	Dr. Ralf Preu	Telefon +49 761 4588-5260 sipv.assessment@ise.fraunhofer.de



EINDIFFUSION VON VERUNREINIGUNGEN IN MC-SILICIUM BLÖCKE

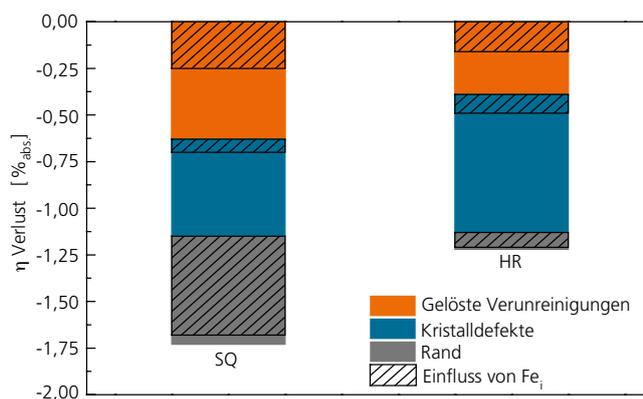
Selbst bei Verwendung von hochreinem Feedstock ist die elektronische Materialqualität in gerichtet erstarrtem Silicium durch Verunreinigungen limitiert. Der Verunreinigungseintrag während des Kristallisationsprozesses ist der Hauptgrund dafür, dass die Materialqualität im Blockzentrum verringert wird und die Blockkappe, der Blockboden sowie ein breiter Blockrand nicht zu Wafern verarbeitet werden kann. Durch genaue Charakterisierung und Simulationen des Verunreinigungsprozesses konnten die Hauptmechanismen für die verschlechterte Materialqualität quantitativ ermittelt werden. So werden gezielte technologische Verbesserungen für eine verminderte Verunreinigung des Siliciumblocks möglich.

Alireza Abdollahinia, Wolfram Kwapil, Stephan Riepe, Florian Schindler, Claudia Schmid, **Jonas Schön**, Martin C. Schubert, Wilhelm Warta, Stefan Glunz

Für das Projekt wurden Bor-dotierte Siliciumblöcke mit unterschiedlich reinen Tiegeln und Tiegelbeschichtungen kristallisiert und Verunreinigungskonzentrationen sowie spezielle Defekte orts aufgelöst gemessen. Eisen stellte sich dabei als die entscheidende Verunreinigung für die Limitierung der Ladungsträgerlebensdauer heraus.

Mit einem am Fraunhofer ISE entwickelten Modell für die Präzipitation und Diffusion in Silicium, Tiegel und Beschichtung sowie simulierten Temperaturdaten lässt sich nun die Eindiffusion in die Siliciumschmelze und den -festkörper während des gesamten Kristallisationsprozesses beschreiben. Für die verschiedenen Blöcke zeigen simulierte und gemessene Eisenverteilung eine sehr gute Übereinstimmung (Abb. 1). Durch die genaue Analyse lässt sich das Potenzial von reineren Tiegelmaterialien und Prozessoptimierungen evaluieren: Durch Verwendung eines hochreinen Tiegels lassen sich besonders die Eindiffusionszonen, und damit die nicht für Solarzellen

1 Messung der gelösten Eisenkonzentration (Fe_i in cm^{-3}) an einer Vertikalscheibe des mit hochreinem Tiegel hergestellten Blocks. Die sehr gute Übereinstimmung mit den Simulationen ist an den überblendeten Bereichen erkennbar.



2 Analyse (ELBA) materialbedingter Verluste für PERC-Zellen aus Standardmaterial (SQ) und für Material, das mittels hochreinen Tiegeln hergestellt wurde (HR). Besonders Zellen aus Standardmaterial sind durch Eindiffusion von Verunreinigungen aus dem Tiegelsystem limitiert.

nutzbaren Bereiche, verkleinern. Die begrenzte Reinheit verfügbarer Beschichtungen schränkt aber das Verbesserungspotenzial in randfernen Gebieten ein. Die Simulationen erlauben zudem die Übertragung der Ergebnisse auf große industrielle Tiegelsysteme.

Ladungsträgerlebensdauer- und Eisenmessungen an z. T. prozessierten Wafern wurden verwendet, um mittels »Efficiency Limiting Bulk Recombination Analysis« (ELBA) spezifische Wirkungsgradverluste der verschiedenen Materialien zu bestimmen (Abb. 2).

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.



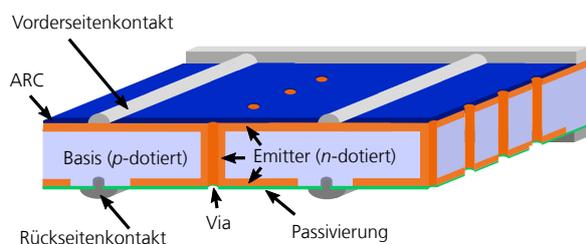
TECHNOLOGIEENTWICKLUNG FÜR SOLARZELLEN AUS UMG-SILICIUM

Die Herstellung von Solarzellen aus weniger hoch aufgereinigten Silicium-Ausgangsmaterialien (Feedstock) ermöglicht signifikante Rohstoffkosteneinsparungen. Um aus diesen Materialien effiziente Solarzellen herstellen zu können, haben wir im Projekt »Silicon-Beacon« erfolgreich neue Technologien für die Herstellung von Siliciumblöcken, -wafern und -solarzellen entwickelt. Zur Nutzung von aufgereinigtem metallurgischem Silicium (Upgraded Metallurgical Grade Silicon – UMG-Si) mit einer Reinheit bis 99,999% (5N) haben wir das Konzept der beidseitig sammelnden und kontaktierbaren Solarzelle (BSK) entwickelt. Für am Markt verfügbare UMG-Rohstoffe konnten wir Effizienzen von über 17% auf multikristallinen Wafern demonstrieren.

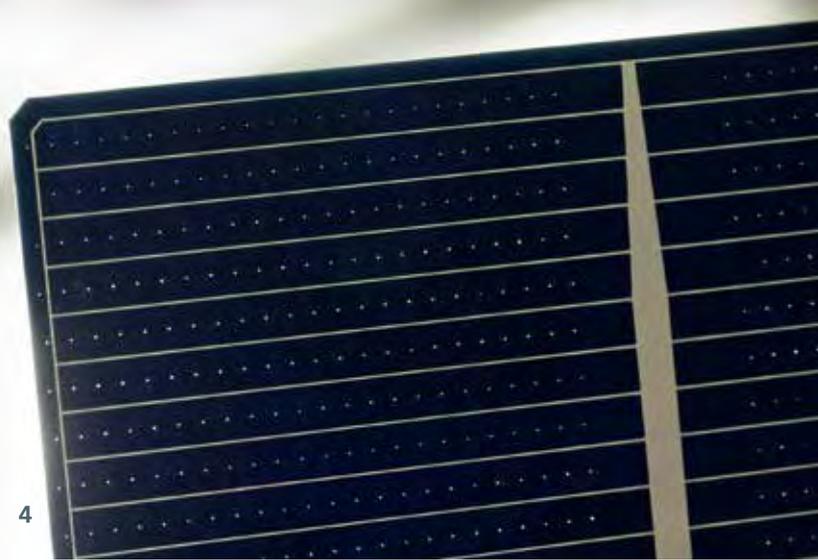
Daniel Biro, Florian Clement, **Fabian Fertig**, Fridolin Haas, Philipp Häuber, Karin Krauß, Stefan Reber, Stefan Rein, Stephan Riepe, Mark Schumann, Andreas Bett, Ralf Preu

Der Einsatz von UMG-Si (Abb. 1) für die Herstellung von Siliciumblöcken (Abb. 2) und -wafern (Abb. 3) erfordert eine Weiterentwicklung etablierter Technologien wie des am Fraunhofer ISE eingesetzten Vertical-Gradient-Freeze-Verfahrens und des Multidrahtsägens. Aufgrund erhöhter Konzentrationen an Dotierstoffen und Verunreinigungen im Feedstock muss sowohl der Kristallisationsprozess als auch das verwendete Tiegelsystem im Ofen optimiert werden. So können wir den für Solarzellen vorteilhaften spezifischen Widerstand durch gezielte Nachdotierung während des Erstarrungsprozesses einstellen und damit einen Umschlag von p- zu n-leitendem Silicium vermeiden. Eine Detektion von Siliciumkarbid- und -nitrid-Einschlüssen in den aus Blöcken geschnittenen Säulen ist mittels Infrarot-Methoden wegen der Absorptionseigenschaften von kompensiertem Silicium nur bedingt möglich. Daher haben wir durch die Optimierung der Gasspülung über der Siliciumschmelze sowie die Anpassung der thermischen Erstarrungsprofile Blöcke hergestellt, die im Volumen keine für das Multidrahtsägen schädlichen Ausscheidungen aufweisen.

Da Siliciumwafer aus Feedstockmaterialien mit einer reduzierten Reinheit von 4N und 5N typischerweise geringe Ladungsträgerlebensdauern und hohe Basisdotierungen aufweisen, haben wir mit der beidseitig sammelnden und kontaktierbaren Solarzelle (BSK) eine auf diese Eigenschaften gezielt angepasste Solarzellenstruktur entwickelt. Die Struktur (Abb. 5) zeichnet sich durch einen über Löcher (Abb. 4) verbundenen vorder- und rückseitigen Emitterbereich aus. Dadurch können auch nahe der Rückseite generierte Ladungsträger effizient gesammelt werden. Das Kontaktgitter auf der Rückseite ermöglicht eine bifaciale Anwendung und folglich weiteren Stromgewinn. Durch die bifaciale Anwendung kann



5 Struktur der beidseitig sammelnden und kontaktierbaren (BSK) Solarzelle.



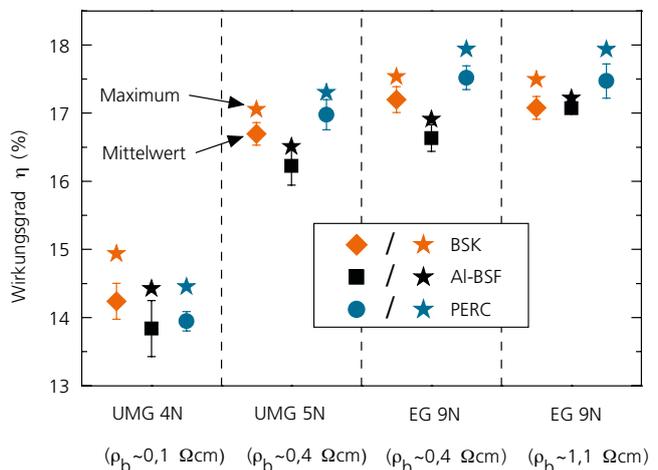
der Ertrag eines solchen PV-Systems signifikant erhöht werden. Das Standard-Busbar-Layout erlaubt die Verwendung konventioneller Verschaltungstechnologie. Mit zwei Zusatzschritten gegenüber dem Standardsolarzellen-Prozess (Al-BSF) ist die Prozesskomplexität gering und entspricht der einer Solarzelle mit passivierter Rückseite (PERC).

Im Rahmen des Projekts wurde die Zellstruktur eingehend simuliert, eine erste technologische Prozessroute entwickelt und auf unterschiedlichen Materialien getestet. Gegenüber Al-BSF Zellen konnte auf hochdotierten Materialien unterschiedlicher Reinheit ein Wirkungsgradgewinn von absolut 0,4–0,6% im Mittel und 0,5–0,6% in der Spitze erreicht werden, wohingegen auf nicht hochdotiertem »Electronic Grade« (EG) Silicium – wie zu erwarten – kein Gewinn erzielt wurde (Abb. 6). Trotz des sehr frühen Entwicklungsstadiums der BSK-Struktur werden die Wirkungsgrade von PERC-Solarzellen bereits jetzt nahezu erreicht und für äußerst günstiges 4N Silicium sogar übertroffen.

Im Rahmen einer umfassenden ökonomischen Bewertung konnte nachgewiesen werden, dass das BSK-Konzept auf UMG-Si gegenüber dem Al-BSF und PERC-Konzept bei einer angenommenen Einsparung von 50% im Feedstockpreis einen signifikanten Kostenvorteil in den Stromgestehungskosten hat. Dies unterstreicht die wirtschaftliche Relevanz des BSK-Konzepts.

Als ein zentrales Ergebnis des von der Fraunhofer-Stiftung geförderten Projekts »Silicon Beacon« konnte gezeigt werden, dass die Kostenersparnis im Siliciumpreis einhergehend mit optimierter Kristallisation und Zellfertigung zu einem Absenken der Stromgestehungskosten führen kann.

- 1 UMG-Si-Feedstock.
- 2 Siliciumkristall aus 12 kg UMG-Si-Feedstock mit einer Reinheit von 5N (99,999% Si).
- 3 Multikristalliner Siliciumwafer aus UMG-Si-Feedstock.
- 4 BSK-Solarzelle: Die Löcher, die der Durchkontaktierung des rückseitigen Emitters auf die Vorderseite dienen, sind als helle Punktreihen zu erkennen.



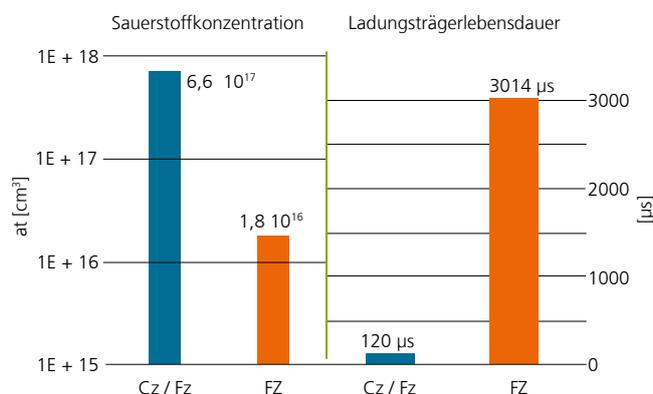
- 6 Mittlere und Spitzen-Wirkungsgrade von BSK-, Al-BSF- und PERC-Solarzellen auf multikristallinen Materialien mit unterschiedlichen Basiswiderständen aus UMG-Si-Feedstock mit geringen Reinheiten von 99,99% (4N) bzw. 99,999% (5N) und hochreinem EG-Si Feedstock (9N). Die Zellfläche beträgt jeweils $15,6 \times 15,6 \text{ cm}^2$. Alle Messungen erfolgten auf einem nicht-reflektierenden Chuck, d. h. bei den BSK-Solarzellen sind keine bifacialen Gewinne berücksichtigt.



FLOAT-ZONE-KRISTALLE AUS VORGEZOGENEM FEEDSTOCK

Float-Zone-Kristalle zeichnen sich durch sehr geringe Sauerstoffgehalte sowie durch eine sehr hohe Ladungsträgerlebensdauer aus. Damit sind Float-Zone-Wafer das prädestinierte Material für Hocheffizienzellen oder für Zellen mit minimalen Degradationserscheinungen. Insbesondere die mangelnde Verfügbarkeit von geeignetem Ausgangsmaterial verhinderte bislang eine stärkere Marktdurchdringung, obwohl der Float-Zone-Prozess als solcher eine bessere Kostenstruktur aufweist, als das standardmäßig verwendete Czochralski-Verfahren. Das Float-Zone-Verfahren arbeitet tiegelfrei und mit höheren Kristallisationsraten.

Rainer Barth, **Peter Dold**, Thorsten Eckardt, Malte Ernst, André Henkel, Roland Kunert, Stefan Wieczorek, Frank Zobel, Andreas Bett



2 Sauerstoffkonzentration und Ladungsträgerlebensdauer in vorgezogenen Vorratsstäben (blau) und daraus hergestellten 4 Zoll FZ-Kristallen (orange). Der Sauerstoff kann um mehr als eine Größenordnung reduziert werden, die Ladungsträgerlebensdauer steigt um das 25fache. Sauerstoffbestimmung: FT-IR (CIS, Erfurt); Lebensdauer: QSSPC (Quasi-Steady-State Photo Conductance) (CSP-ZTN Halle).

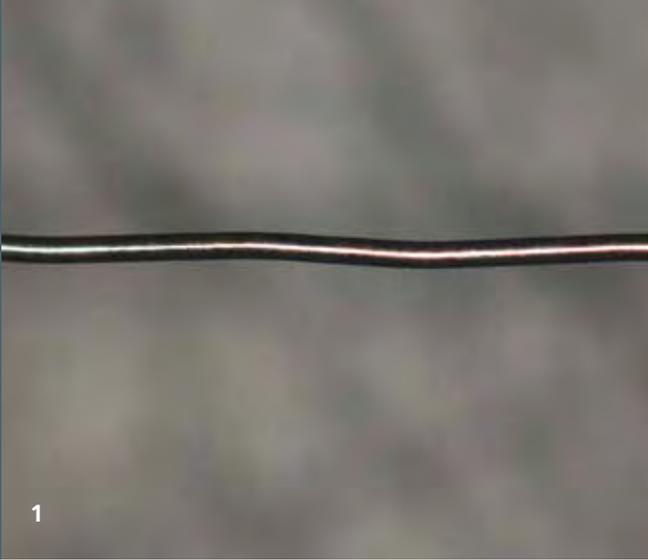
1 Float-Zone-Einkristalle, hergestellt aus vorgezogenen Vorratsstäben. Durchmesser: 4 Zoll.

Unser Ansatz beruht auf dem Umschmelzen von Standard-Solarsilicium (Chunks, Granulat, Waferbruch) in Float-Zone-taugliche Ausgangsstäbe. Für das Umschmelzen haben wir einen modifizierten Ziehprozess entwickelt, der durch schnelle Kristallisation und Ziehen mehrerer Stäbe aus einem Tiegel eine hohe Produktivität sicherstellt. Da Strukturverluste beim Ziehen von Vorratsstäben keine Rolle spielen, erreichen wir eine Ausbeute von 100%.

Die gezogenen Vorratsstäbe wurden anschließend in einer Float-Zone-Anlage (FZ-14, PVA TePla) in 4 Zoll Float-Zone-Kristalle überführt. P- und n-Typ Kristalle verschiedener Widerstandsbereiche wurden hergestellt (Abb. 1) und elektrisch / spektroskopisch charakterisiert. Mit einer Sauerstoffkonzentration im Bereich $1-2 \cdot 10^{16}$ at/cm³ und einer Ladungsträgerlebensdauer im Bereich größer 2 ms liegen diese Wafer deutlich über den Werten normaler monokristalliner Ingots (Abb. 2).

Das Vorziehen von Vorratsstäben aus einfach am Markt verfügbarem Solarsilicium erlaubt somit eine kostengünstige Herstellung von Wafern hoher Materialgüte. Im nächsten Schritt erhöhen wir den Durchmesser der Float-Zone-Kristalle von 4 Zoll auf 8 Zoll.

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Projekts »FZ-Sil« gefördert.



1



2

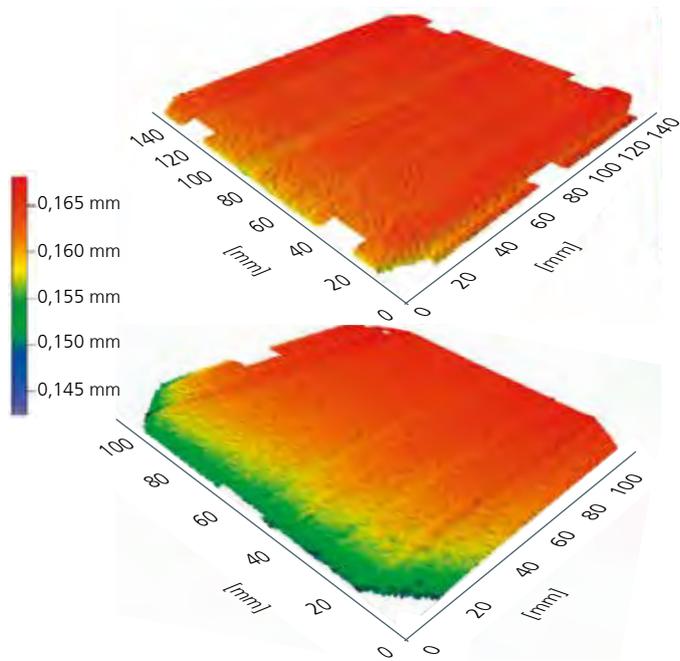
SLURRY BASIERTER DRAHTSÄGEPROZESS MIT STRUKTURIERTEN DRÄHTEN

Der größte Teil der weltweit produzierten Solarzellen basiert auf Wafern, die mittels Drahtsägen aus Siliciumkristallen hergestellt werden. Bei diesem Drahtsägeprozess wird der Kristall durch mehrere hundert Drahtschlaufen geführt und unter Zugabe eines Abrasivmediums in Wafer zersägt. Unsere Weiterentwicklung dieser Sägetechnik umfasst Untersuchungen zum Einsatz von strukturiertem Draht anstelle des aktuell eingesetzten geraden Drahts. Der strukturierte Draht ermöglicht höhere Vorschübe und damit eine signifikante Kosteneinsparung für den Drahtsägeprozess. Ein Schwerpunkt unserer Untersuchungen liegt auf dem Einfluss der Prozessparameter, welche die Wafergeometrie und den Durchsatz maßgeblich bestimmen.

Philipp Häuber, Stephan Riepe, Devid Sabo, **Bernd Weber**, Andreas Bett

Der standardmäßig eingesetzte industrielle Sägeprozess, basierend auf dem Einsatz einer Siliciumcarbid-Suspension (Slurry) und geradem Stahldraht, hat den Nachteil, dass die Wafer nach dem Sägen eine Keilform aufweisen. Durch den Einsatz von strukturiertem Draht können wir Wafer herstellen, die eine gleichmäßigere Dicke über die gesamte Fläche und damit eine stark reduzierte Keilform zeigen. Die Strukturierung des Sägedrahts (Abb. 1) bewirkt, dass die Sägeslurry effizienter in den Schnittspalt gelangt und ein stabilerer Sägevorgang abläuft, so dass keine Riefen oder Ungleichmäßigkeiten auf der Waferoberfläche sichtbar sind (Abb. 2). Zusätzlich sind die Prozesszeiten deutlich verkürzt, da die Schnitteffizienz durch die Drahtstrukturierung gesteigert wird und somit größere Vorschübe realisiert werden können. Wir konnten mit strukturiertem Draht eine bis zu 50% geringere Dickenvarianz über die Waferfläche bei gleichzeitig ca. 30% höherem Vorschub im Vergleich zu geradem Draht erreichen (Abb. 3). Ein weiterer Vorteil ist, dass die derzeit genutzten Slurrysägen

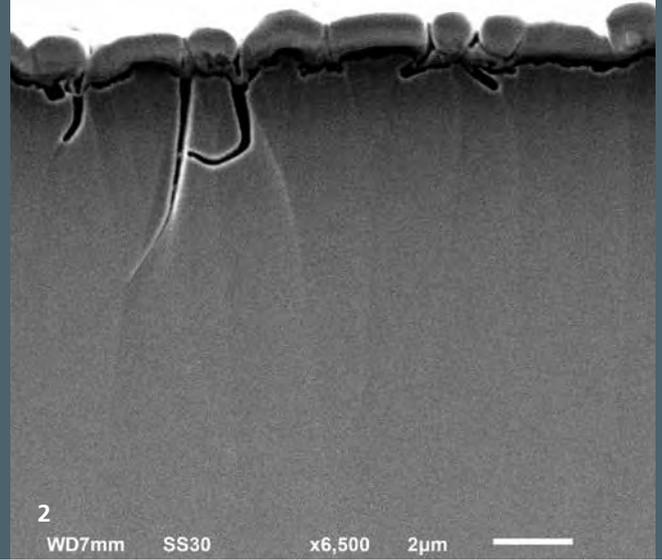
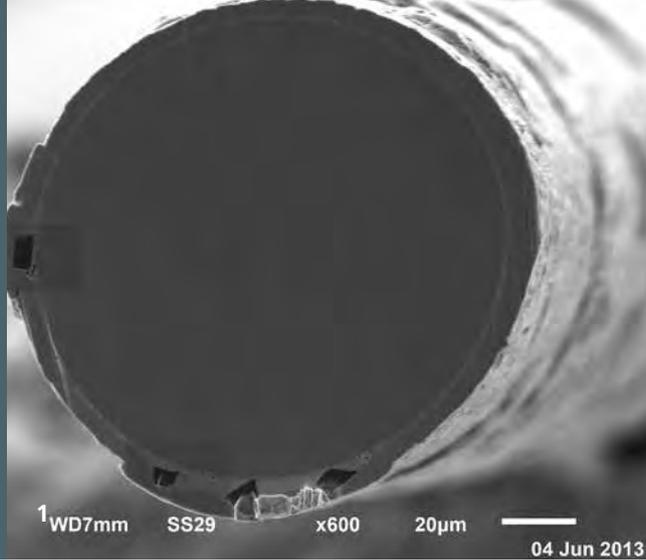
- 1 Mikroskopaufnahme eines strukturierten Drahts.
- 2 Monokristalliner Wafer mit geringer Dickenvarianz, der mit strukturiertem Draht geschnitten wurde.



- 3 Dickenverteilungen monokristalliner Wafer mit den Abmessungen $156 \times 156 \text{ mm}^2$ bzw. $125 \times 125 \text{ mm}^2$, die mit strukturiertem Draht (oben) und mit geradem Draht (unten) geschnitten wurden. Die Skalierung macht die Oberflächeneigenschaften deutlich sichtbar.

nur geringfügig für den Einsatz von strukturiertem Draht umgerüstet werden müssten. Diese Vorteile gelten sowohl für das Sägen von monokristallinem wie auch multikristallinem Silicium. Der strukturierte Draht ist damit ideal geeignet, um auf den bestehenden Anlagen erhebliche Kosteneinsparungen bei gleichzeitiger Qualitätsverbesserung zu erzielen.

Die Arbeiten wurden durch die Fraunhofer-Stiftung und die Europäische Kommission im Rahmen des Projekts »20plus« unterstützt.

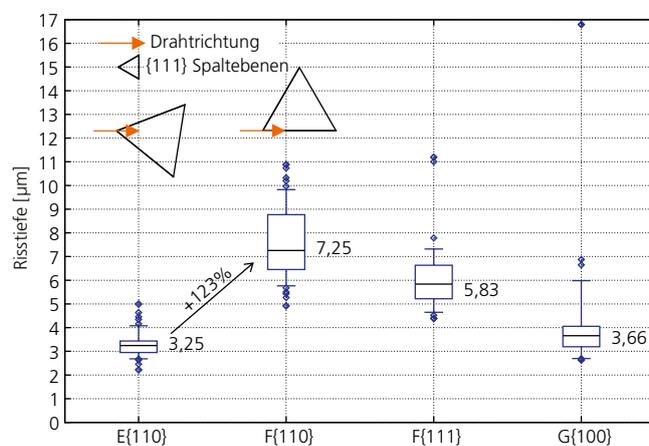


SILICIUMWAFER-HERSTELLUNG MIT DIAMANTBESETZTEM SÄGEDRAHT

Die Waferherstellung mittels diamantbesetzten Sägedrahts ist neben dem konventionellen Sägeprozess mit losem Abrasiv eine zukunftsweisende, alternative Trenntechnologie. Der technologische Unterschied liegt in erster Linie in der Sägedrahtbestückung mit fest anhaftenden Diamantkörnern. Dadurch liegt ein veränderter Abtragsprozess vor. Die Erforschung und Weiterentwicklung dieser Technologie ist ein Schwerpunkt des Fraunhofer Technologiezentrums für Halbleitermaterialien THM. Unsere Ergebnisse zeigen, dass die Oberflächenschädigung von mono- und multikristallinem Siliciummaterial abhängig von der Kristallorientierung ist.

Rajko Buchwald, Marcel Fuchs, Killian Fröhlich, Hans Joachim Möller, Stefan Retsch, Sindy Würzner, Andreas Bett

Die Nutzung von diamantbesetzten Drähten zur Siliciumwafer-Herstellung ist relativ neu, weshalb hoher Bedarf bei der Prozessentwicklung besteht. Für eine industrielle Nutzung die-

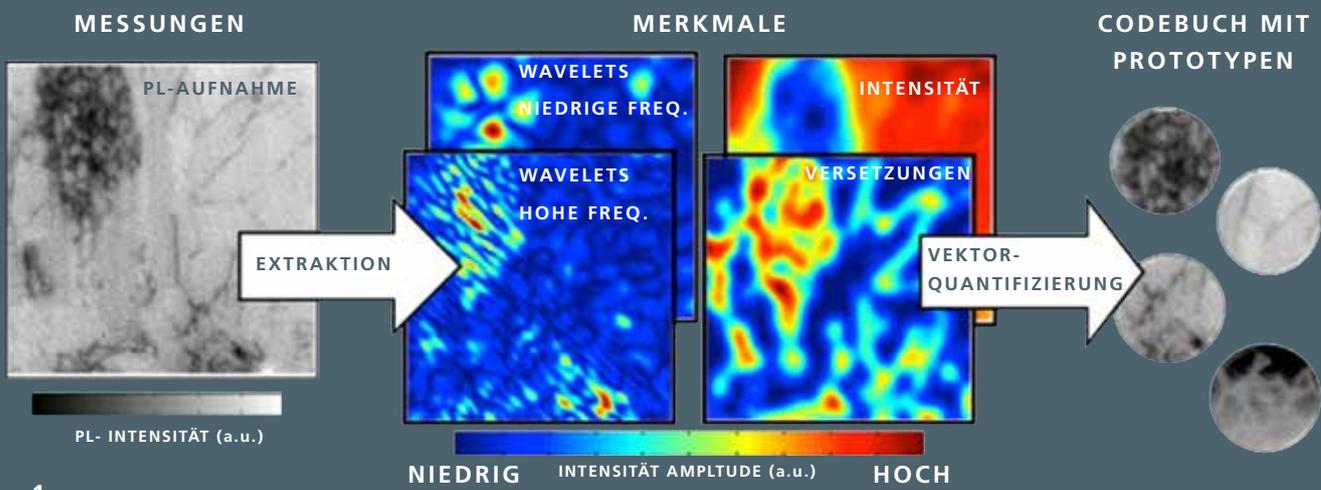


3 Maximale Risstiefen in Abhängigkeit der Oberflächenkristallorientierung eines multikristallinen Siliciumwafer.

- 1 Hochaufgelöstes REM-Bild eines kommerziellen diamantbesetzten Sägedrahtquerschnitts. Um den Kerndraht sind die Nickelbeschichtung sowie vier durchschnittliche Diamanten zu sehen.
- 2 REM-Aufnahme eines Waferquerschnitts zur Mikrorisstiefenbestimmung. Der Querschnitt verläuft senkrecht zur Sägerichtung. Die Mikrorisse sind als dunkler Kontrast mit heller Umrandung sichtbar.

ser Technologie sind zum Teil grundlegende Untersuchungen sowie innovative Prozessoptimierungen notwendig. Die technische und analytische Ausrüstung des Fraunhofer THM wurde auf dieses Forschungsziel ausgerichtet. Für die Sägeversuche haben wir eine industrielle Vieldrahtsäge technisch optimiert und mit zusätzlicher Messtechnik versehen. Damit wurden Wafer aus mono- und multikristallinem Silicium hergestellt und deren Oberflächen-, Riss- und Bruchigenschaften mittels speziell angepasster oder optimierter optischer und mechanischer Messsysteme charakterisiert. Durch die Auswertung dieser Eigenschaften lässt sich einerseits der Sägeprozess optimieren, andererseits aber auch die Bruchanfälligkeit der Wafer im industriellen Maßstab bestimmen und verbessern. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass die maximale Risstiefe auf einem Wafer in Abhängigkeit von der Kristallorientierung um einen Faktor 2 schwankt (Abb. 3). Für Oberflächen mit einer {110}-Orientierung liegen zwei Spaltebenen senkrecht zur Oberfläche vor. In Abhängigkeit des Winkels zwischen Sägedraht und den Spaltebenen kann im ungünstigsten Fall die Risstiefe um 123% steigen. Das kann eine reduzierte Bruchspannung zur Folge haben, was durch Bruchtests bestätigt wurde.

Die Arbeiten wurden durch den Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE), das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst (SMWK) sowie die Sächsische AufbauBank (SAB) gefördert.



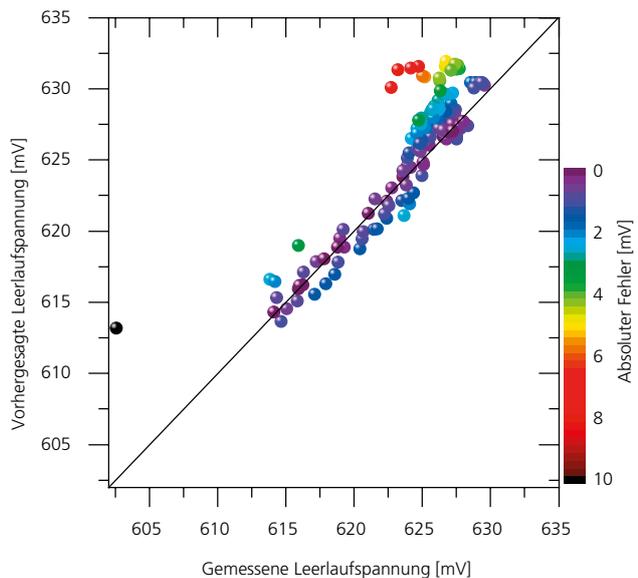
VORHERSAGE VON SOLARZELLEN-PARAMETERN MULTIKRISTALLINER WAFER

Die Qualitätskontrolle von multikristallinen Siliciumwafern ist eine große Herausforderung für die PV-Industrie. Für Solarzellenhersteller ist es essentiell, minderwertiges Material in der Eingangskontrolle zu identifizieren und auszusortieren. Photolumineszenz-Aufnahmen (PL) am Rohwafer ermöglichen die Detektion relevanter Kristallisationsdefekte. Um die Defekte quantifizieren zu können, müssen leistungsfähige Bildverarbeitungs-algorithmen entwickelt werden. Aus diesen Defektmerkmalen werden Klassierschemata zur Bewertung des Materials abgeleitet. Diese müssen auch Material eines unbekannt Blocks oder Herstellers zuverlässig bewerten können. Ziel ist, ein robustes Verfahren der Qualitätsbewertung zu entwickeln und als weltweiten Standard zu etablieren.

Matthias Demant, Jonas Haunschild, Stefan Rein, Ralf Preu

Die Messung der Photolumineszenz hat sich als eine Schlüsseltechnologie zur Bewertung der Materialqualität von mc-Si-Wafern entwickelt. In den ortsaufgelösten Aufnahmen werden zahlreiche Kristallisationsdefekte sichtbar. Defektmerkmale überlagern sich in den Aufnahmen und variieren stark in ihren Ausprägungen. Dies ist eine besondere Herausforderung bei der Interpretation der Daten. Zur Unterscheidung und Quantifizierung der Defektmerkmale wurden Mustererkennungsmethoden entwickelt, um den Wafer anhand repräsentativer Defektstrukturen zu beschreiben (Abb. 1). Weitere relevante Messgrößen, wie Dotierung und Lebensdauer, wurden ergänzt. In einem umfangreichen Experiment mit Siliciumblöcken unterschiedlicher Hersteller wurde die Eignung dieser Beschreibung zur Bewertung der Materialqualität getestet. Anhand des umfangreichen Datensatzes konnte mittels maschineller Lernmethoden ein Modell zur Vorhersage der Leerlaufspannung der Solarzelle trainiert werden. Bei der Anwendung des Verfahrens auf einen vollständig »unbekannten« Block konnte

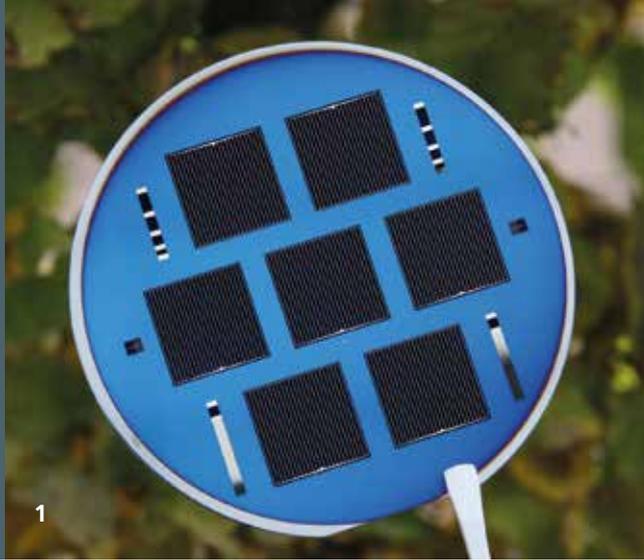
1 Aus dem PL-Bild werden verschiedene Merkmale ausgelesen. Hierbei werden u. a. Wavelets verwendet, die jeden Bildausschnitt als Ausprägungen räumlich lokalisierter Wellen unterschiedlicher Ausdehnung und Frequenz darstellen. Häufig auftretende Merkmalskombinationen werden als typische PL-Strukturen in einem Codebuch erfasst. Die Wafer werden anhand der Verteilung der auftretenden PL-Strukturen beschrieben und bewertet.



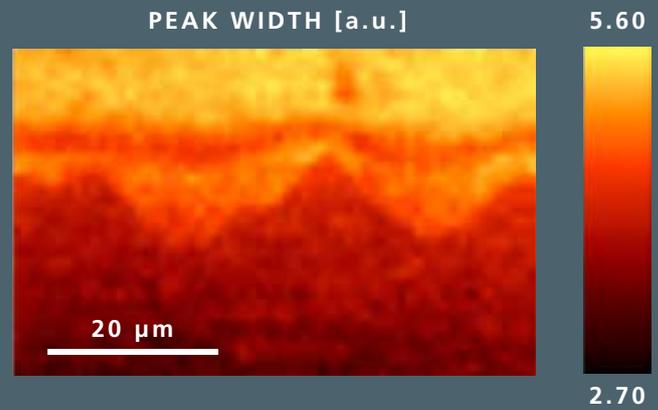
2 Nach dem Verfahren aus Abb. 1 wurden aus PL-Aufnahmen an unbehandelten Wafern prototypische Merkmale extrahiert und ein Modell zur Vorhersage der Leerlaufspannung trainiert. Dargestellt ist das Vorhersageergebnis der Leerlaufspannung von 164 Wafern aus drei Bricks eines unbekannt Blocks. Die geringe Abweichung von im Mittel weniger als 0,3% relativ zeigt die Eignung des Verfahrens.

die Leerlaufspannung mit einem mittleren absoluten Fehler von 1,7 mV (0,3%_{rel}) vorhergesagt werden (Abb. 2).

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.



1



2

SOLARZELLEN MIT EPITAKTISCHEN EMITTERN MIT 20% WIRKUNGSGRAD

Die Herstellung von Emitterschichten ist ein wichtiger Prozessschritt bei der Fertigung von Solarzellen. Normalerweise werden diese durch die Diffusion von Bor oder Phosphor hergestellt. Bei der industriellen Realisierung fortgeschrittener Zellkonzepte mit Wirkungsgraden über 20%, für die tief eingetriebene Emmitter vorteilhaft sind, zeigen sich die Grenzen der Diffusion. Eine alternative Technologie mit zehnfach kürzerer Prozesszeit ist das epitaktische Aufwachsen von Siliciumschichten. Diese epitaktischen Schichten ermöglichen die Herstellung von angepassten und optimierten Emittlern mit unabhängig voneinander einzustellender Tiefe und Dotierung.

Jan Benick, Elke Gust, Martin Hermle, Stefan Janz, Martin Keller, Harald Lautenschlager, Nena Milenkovic, **Thomas Rachow**, Stefan Reber, Bernd Steinhauser, Andreas Bett, Stefan Glunz

Solarzellen-Wirkungsgrade über 20% mit epitaktischen Emittlern zu zeigen, war die Aufgabe im Projekt »EpiEm«, das wir mit dem Kooperationspartner RENA bearbeitet haben. Dafür mussten wir sowohl defektarme Epitaxie-Schichten auf mono- und multikristallinen Wafern wachsen als auch die Hocheffizienz-Solarzellenprozesse auf den neuen Emmitter anpassen. Nach intensiver Charakterisierung der Grenzschichten und der Kristallstruktur (Abb. 2) sowie parallel durchgeführter Prozessoptimierung, gelang es, die Qualität des Emitters deutlich zu verbessern. Damit stehen nun Hocheffizienz-taugliche epitaktische Emmitter mit Sättigungsströmen unter 50 fA/cm² zur Verfügung.

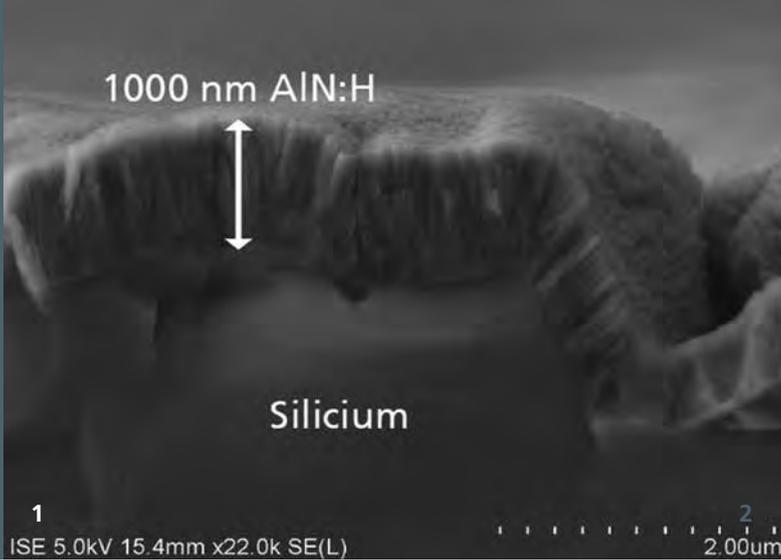
1 20 x 20 mm² große n-Typ PERL-Solarzellen mit epitaktisch gewachsenen Emittlern. Das Zellkonzept beinhaltet eine Aluminiumoxid-Passivierung mit SiN_x-Antireflexschicht sowie eine auf a-SiC basierende passivierte Rückseite mit lokalen Kontakten.

2 Beispiel einer Mikro-Raman-Messung an einem auf Pyramiden-Textur gewachsenen epitaktischen Emmitter. Diese leistungsfähige Messmethode gibt uns wichtige Informationen u. a. zu Stress, Dotierung oder Rekombination.

Ein wesentlicher Vorteil im Vergleich zur Diffusion ist, dass verschiedene Dotierarten ohne grundsätzliche Änderung des Abscheideprozesses hergestellt werden können. Die Integration in den Solarzellenprozess wurden deshalb sowohl auf n-Typ, als auch auf p-Typ Wafern mit angepasstem PERL-Zellkonzept durchgeführt (Abb. 1). Damit entstanden Solarzellen mit 20% Wirkungsgrad und über 81% Füllfaktor, was das Potenzial des epitaktischen Emitters verdeutlicht.

Die Vorteile des epitaktischen Emitters – wie Einsparung von einigen bisher notwendigen Maskierungs- / Ätzschritten und höhere Feuertoleranz – sollen zukünftig in industrielle Solarzellenprozesse umgesetzt und das Kostenreduktionspotenzial experimentell demonstriert werden. Ein wichtiges Arbeitsziel ist die Übertragung des Epitaxieprozesses auf unsere Hochdurchsatz-Abscheideanlagen.

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.



GESPUTTERTES ALUMINIUMNITRID ZUR PASSIVIERUNG VON SOLARZELLEN

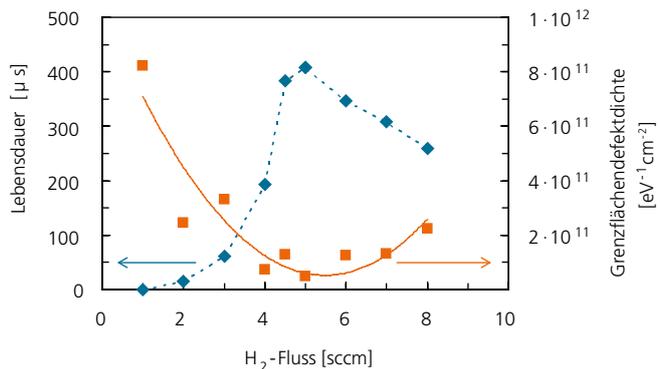
Ein Schlüssel, um höchste Wirkungsgrade zu erreichen, liegt in der optimalen Passivierung der Siliciumoberflächen. Nur so kann verhindert werden, dass die durch das einfallende Licht erzeugten Elektron-Loch-Paare rekombinieren, bevor sie zum nutzbaren Strom beitragen können. Die etablierten Verfahren zur Oberflächenpassivierung haben allerdings auch deutliche Nachteile. So sind sie zum Teil mit hohen Materialkosten verbunden oder weisen niedrige Beschichtungsraten (z. B. bei ALD) auf. Wir haben eine für Solarzellen vollkommen neue Schicht entwickelt, die aus gesputtertem hydrogениerten Aluminiumnitrid (AlN:H) besteht. Diese Schicht sollte eine sehr gute Passivierungswirkung, thermische Stabilität und ein kostengünstiges Abscheidungsverfahren miteinander kombinieren.

Georg Krugel, Jochen Rentsch, **Winfried Wolke**, Ralf Preu

In der Optoelektronik oder der Sensorik wird Aluminiumnitrid schon seit einiger Zeit wegen seiner guten optischen und elektronischen Eigenschaften genutzt. Im Bereich der Photovoltaik wird das Material aber bisher nicht verwendet und war so gut wie nicht bekannt.

Für die Entwicklung der neuen Schicht wurde das Verfahren der Kathodenzerstäubung, kurz Sputtern, verwendet. Diese Technik hat sich im Bereich der PV als sowohl kostengünstig, gut hochskalierbar, als auch in den Abscheidebedingungen sehr variabel erwiesen. Es wurde der Ansatz gewählt, mit Mittelfrequenz zwei Aluminiumtargets unter Argon- und Stickstoffzugabe zu sputtern. Zusätzlich wurde Wasserstoff in genau definierter Menge zugegeben. Die so durchgeführten Beschichtungen unter Optimierung des Wasserstoffflusses zeigten exzellente Passivierungseigenschaften aufgrund sehr niedriger Störstellendichten (Abb. 2). Diese Werte wurden auch nach einem Hochtemperaturschritt erzielt. Zudem eignen

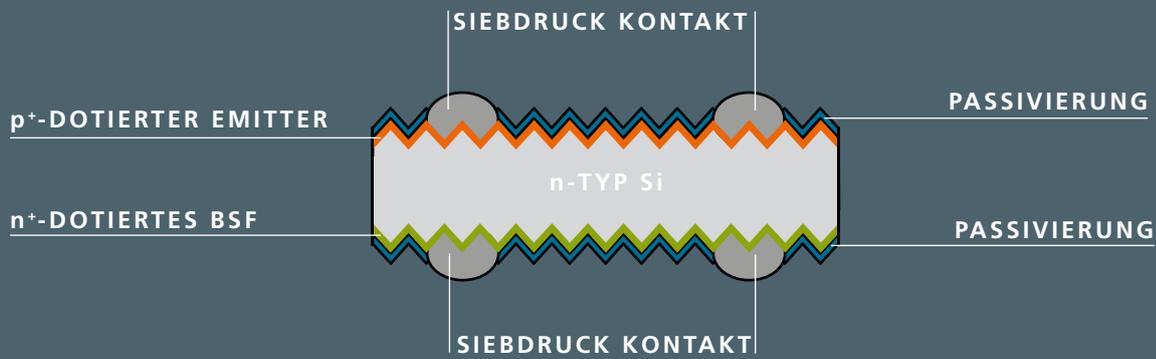
1 REM-Aufnahme von gesputtertem Aluminiumnitrid auf Siliciumwafern.



2 Bestimmung der Lebensdauer und der Defektdichte von gesputtertem Aluminiumnitrid in Abhängigkeit vom Wasserstofffluss während der Abscheidung. Beschichtung von p-Typ 1 ohmcm FZ-Wafern. Mit weiterer Prozessoptimierung wurden Werte über 1000 µs (hier nicht gezeigt) erreicht.

sich die Schichten durch einen Brechungsindex von $n=2$, eine niedrige Absorption und eine sehr gute Passivierung von Standardemittern (J_{0e} um 100 fA/cm^2) als Antireflexschicht. Neben Emittieren aus Phosphor-Diffusion wurden auch Bor-Emitter untersucht, die sich ebenfalls sehr gut mit AlN:H passivieren ließen.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass eine Verwendung von AlN:H auf der Vorderseite der Solarzelle, im Austausch zu dem üblicherweise verwendeten SiN:H, ebenso wie als Rückseitenpassivierung ein äußerst vielversprechender Ansatz zur Wirkungsgradsteigerung ist.

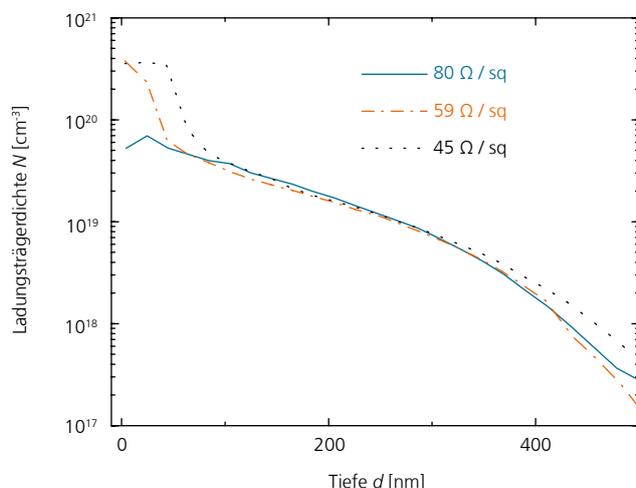


1

INDUSTRIETAUGLICHE CO-DIFFUSIONS-PROZESSE FÜR n-TYP Si-SOLARZELLEN

Der Einsatz von n-dotiertem Silicium (Abb. 1) ist eine Möglichkeit, den Wirkungsgrad von Si-Solarzellen zu steigern. Aktuelle Herausforderung ist dabei die Identifikation industrietauglicher Prozesse, wobei dem Diffusionsprozess eine Schlüsselrolle zukommt. N-Typ Solarzellen weisen meist zwei oder mehr diffundierte Bereiche auf. Ein Ansatz zur Senkung der Kosten sind Co-Diffusionsprozesse, bei denen die benötigten Dotierbereiche in einem einzigen Hochtemperaturschritt erzeugt werden. Am Fraunhofer ISE wurde ein Co-Diffusionsprozess entwickelt, der auf der Verwendung konventioneller Phosphor-Rohröfen-Technologie beruht und daher den Umrüstaufwand bestehender Produktionslinien auf die n-Typ Si-Technologie erheblich zu reduzieren hilft.

Daniel Biro, Sebastian Meier, **Philip Rothhardt**, Andreas Wolf, Ralf Preu

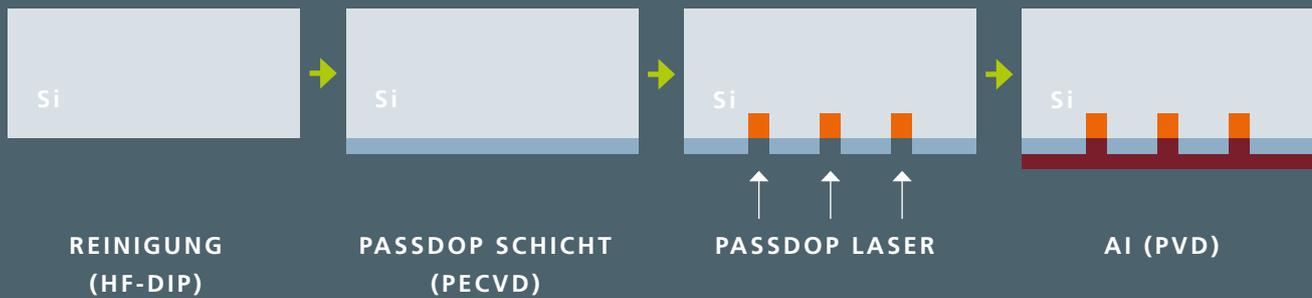


2 Verschiedene Phosphor-Dotierprofile erzeugt in Co-Diffusionsprozessen und zugehöriger Schichtwiderstand. Hierbei lässt sich das Phosphor-Dotierprofil des BSF gezielt einstellen ohne dabei das Bor-Dotierprofil des Emitters zu verändern.

1 Schematische Darstellung einer bifacialen industriellen n-Typ Solarzelle.

Der Ansatz des Fraunhofer ISE besteht darin, unter Verwendung von bereits in der Produktion von Solarzellen genutzten Anlagen einen industrietauglichen Herstellungsprozess zu entwickeln, der möglichst wenige zusätzliche Prozessschritte aufweist. Dabei wird mittels bei Umgebungsdruck durchgeführter chemischer Gasphasenabscheidung eine Bor-dotierte Oxidschicht einseitig auf den Wafer abgeschieden und dann in einem konventionellen Quarzrohröfen eine Phosphor-Diffusion durchgeführt. In diesem Prozess dient die zuvor aufgebraute Bor-dotierte Schicht als Quelle zur Erzeugung des p+-dotierten Emitters, während auf der noch unbeschichteten Seite des Wafers eine Eindiffusion von Phosphor aus der Gasphase zur Erzeugung des n+-dotierten Back Surface Fields (BSF) erfolgt (Abb. 1). Durch diese Prozessführung können im Vergleich zur sequenziellen Diffusion mehrere Prozessschritte eingespart werden. Eine wichtige Herausforderung ist dabei das kontrollierte Eindiffundieren des Phosphors, da für die gleichzeitige Diffusion von Bor hohe Temperaturen benötigt werden. Der am Fraunhofer ISE entwickelte Prozess ermöglicht es, sowohl die zur Kontaktierung benötigte Oberflächendotierung als auch die Tiefe des Phosphor-Dotierprofils unabhängig von der Bor-Dotierung einzustellen (Abb. 2). Erste mittels Co-Diffusion hergestellte Solarzellen erreichen einen Wirkungsgrad von 18,4% (n-Typ Cz-Si Wafer, 156 mm Kantenlänge).

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.



1

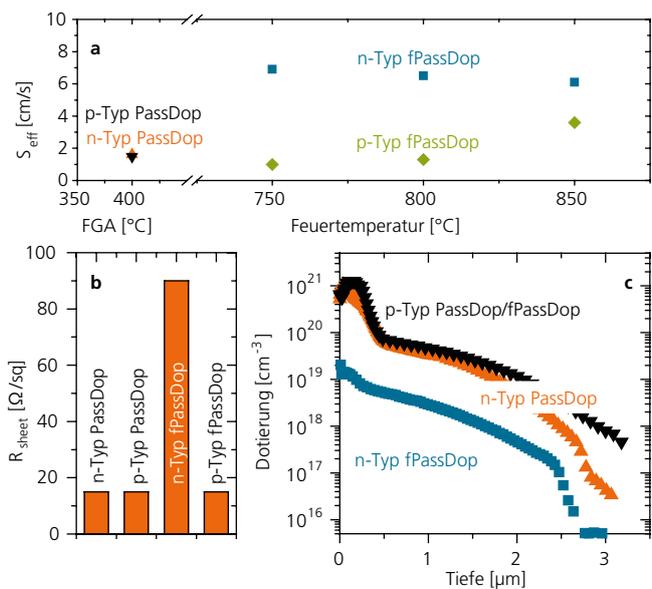
PASSDOP-PROZESS: INDUSTRIENAEHE REALISIERUNG EINER PERC-STRUKTUR

Für die industrielle Fertigung rückseitig passivierter und lokal kontaktierter Solarzellen werden effiziente, kostengünstige Prozesse benötigt. Der PassDop-Prozess kann für Zellen auf n- und p-Typ Silicium angewendet werden. Dabei wird eine dielektrische Schicht auf der Zellenrückseite abgeschieden, die einerseits die Oberfläche passiviert und andererseits Dotierstoff enthält, der anschließend mittels eines Laserprozesses in das Silicium eingetrieben wird. Hierbei wird die Schicht lokal ablatiert, so dass dann direkt das Metall für die Kontaktierung der Rückseite aufgedampft werden kann. Mit diesem Prozess ist es uns gelungen, n-Typ Solarzellen mit Wirkungsgraden bis 23,5% herzustellen.

Jan Benick, Martin Hermle, Ulrich Jäger, Antonio Leimenstoll, Muhammad bin Mansoor, Felix Schätzle, Sonja Seitz, Bernd Steinhauser, Nadine Weber, Stefan Glunz

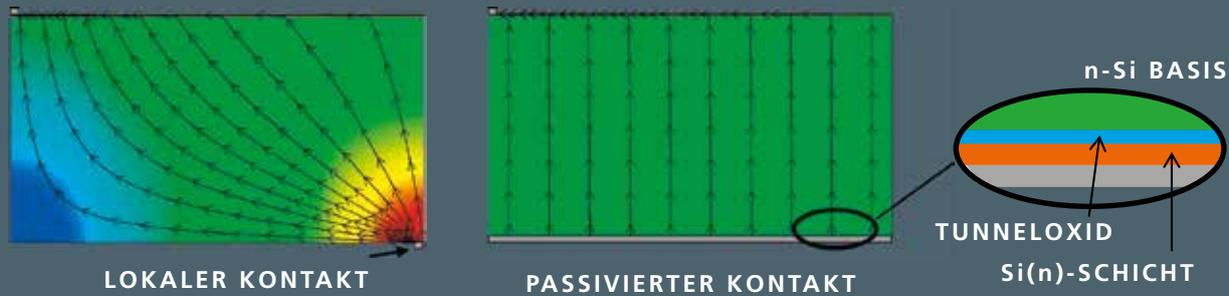
Viele Zellkonzepte für hocheffiziente Siliciumsolarzellen weisen eine passivierte Rückseite mit hochdotierten Bereichen unter den lokalen Kontakten auf. Für die industrielle Herstellung einer solchen Struktur werden Prozesse benötigt, die eine effektive Umsetzung der Struktur erlauben und in der Lage sind, den industriell geforderten Durchsatz zu geringen Kosten zu gewährleisten. Durch die Verbindung von CVD und Laserprozessen ist der PassDop-Prozess hierzu grundsätzlich in der Lage. Durch die Doppelfunktion der einzelnen Prozesskomponenten (Oberflächenpassivierung / Dotierstoffquelle, Kontaktöffnung / lokale Dotierung) wird die relativ komplexe Struktur durch eine sehr schlanke Prozessfolge realisiert, ohne dass dadurch die Qualität negativ beeinflusst wird. Durch eine entsprechende Wahl der dielektrischen Schicht sowie des Dotierstoffs kann der Prozess sowohl für n- als auch für p-Typ Solarzellen verwendet werden. Die gemessenen elektrischen Eigenschaften (Passivierung, Dotierung) des PassDop-Prozesses auf n- und p-Typ Oberflächen werden

1 Prozess-Sequenz des PassDop-Prozesses.



2 Eigenschaften nach dem PassDop-Prozess auf n- und p-Typ Oberflächen: a) Passivierungsqualität als Funktion der thermischen Nachbehandlung, b) Schichtwiderstand der lokalen Dotierung, c) Dotierprofile der lokalen Dotierung.

beispielhaft in Abb. 2 gezeigt. Mit einer Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeit von weniger als 10 cm/s lässt sich für p- und n-dotierte Schichten auch nach dem Feuerschritt eine exzellente Passivierung erreichen. Auch die lokale Laserdotierung aus den PassDop-Schichten ist sehr effektiv; es lassen sich Schichtwiderstände zwischen 30–80 Ω/sq erreichen, wobei im Speziellen für den n-fPassDop-Prozess noch Verbesserungspotenzial besteht. Auf n-Typ Silicium ist es gelungen, mit dem PassDop-Prozess Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 23,5% herzustellen.



1

PASSIVIERTE KONTAKTE FÜR HOCHEFFIZIENTE SILICIUMSOLARZELLEN

Durch die zunehmende Verbesserung der Materialqualität und der Oberflächenpassivierung ist die Rekombination an den Metallkontakten einer der dominanten Verlustmechanismen in Siliciumsolarzellen. Eine Reduzierung dieses Verlusts kann durch die Verwendung von sogenannten passivierten Kontakten erreicht werden, die die Rekombination der Minoritäten unterdrücken und gleichzeitig einen verlustfreien Abtransport der Majoritätsladungsträger erlauben. Auf Basis eines ultradünnen dielektrischen Tunneloxids ist es uns gelungen, einen sehr effektiven passivierten Kontakt (TOPCon) zu realisieren, der die Oberfläche hervorragend passiviert, und gleichzeitig einen geringen Widerstand für den Ladungsträgertransport darstellt.

Jan Benick, Martin Bivour, **Frank Feldmann**, Martin Hermle, Antonio Leimenstoll, Christian Reichel, Felix Schätzle, Christian Schetter, Sonja Seitz, Maik Simon, Harald Steidl, Nadine Weber, Karin Zimmermann, Stefan Glunz

Zur Steigerung des Wirkungsgrads von Siliciumsolarzellen wird das PERC-Konzept (Passivated Emitter Rear locally Contacted) in die industrielle Produktion übertragen. Durch die dielektrische Oberflächenpassivierung und die Reduzierung der metallisierten Fläche zu Punktkontakten lassen sich höhere Spannungen erzielen. Der Spannungsgewinn bringt aber auch einen erhöhten Serienwiderstand mit sich, da die Ladungsträger einen weiteren Weg innerhalb des Siliciums zurücklegen müssen. Die Optimierung einer solchen Struktur erfordert daher den Ausgleich von hoher Spannung (großer Abstand der Punktkontakte) und hohem Füllfaktor (kleiner Abstand der Punktkontakte).

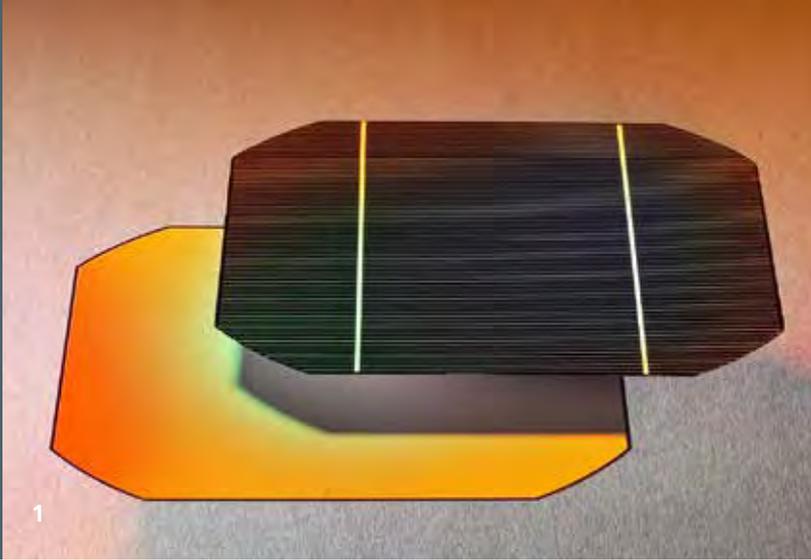
Eine Möglichkeit, diesen Zielkonflikt zu umgehen, liegt in der Verwendung von ganzflächigen selektiven Kontakten, auch passivierte Kontakte genannt. Die Herausforderung bei diesen

1 Simulation des Stromtransports in Solarzellen mit lokaler Kontaktierung (links) und in Zellen mit dem neu entwickelten TOPCon-Rückseitenkontakt (rechts).

Kontakten besteht darin, dass sie zum einen die Rekombination von Ladungsträgern unterdrücken und gleichzeitig einen verlustfreien Transport der Majoritätsladungsträger ermöglichen müssen. Am Fraunhofer ISE wurde ein solcher Kontakt auf Basis eines ultradünnen Tunneloxids und einer dünnen Siliciumschicht (Tunnel Oxide Passivated Contact, TOPCon, Abb. 1) entwickelt und in hocheffiziente Solarzellenstrukturen implementiert.

Die hohen gemessenen effektiven Lebensdauern der TOPCon-Struktur belegen die sehr guten Passiviereigenschaften des verwendeten Schichtsystems. Da das als Tunneloxid verwendete Siliciumoxid auch für die Majoritätsladungsträger prinzipiell eine Barriere darstellt, muss diese so dünn ausgebildet werden, dass die Ladungsträger diese mittels quantenmechanischer Tunnelprozesse überwinden können. Um diesen Ladungsträgertransport zu untersuchen, wurden hocheffiziente n-Typ Solarzellen mit einem diffundierten vorderseitigen Bor-Emitter und dem ganzflächigen TOPCon-Rückseitenkontakt hergestellt. Sehr hohe Füllfaktoren von über 82% und Spannungen von über 700 mV belegen, dass sich der Ladungsträgertransport über das Tunneloxid nahezu verlustfrei vollzieht. Dies zeigt, dass mit der TOPCon-Struktur ein hervorragender selektiver passivierter Kontakt realisiert wurde. Insgesamt konnte mit der TOPCon-Rückseite ein einfacher und strukturierungsfreier Rückseitenkontakt etabliert werden, mit dem wir auf hocheffizienten n-Typ Solarzellen Wirkungsgrade von bis zu 24% realisieren konnten.

Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.



EINFACHE n-TYP SILICIUMSOLARZELL-KONZEPTE MIT PERC-TECHNOLOGIE

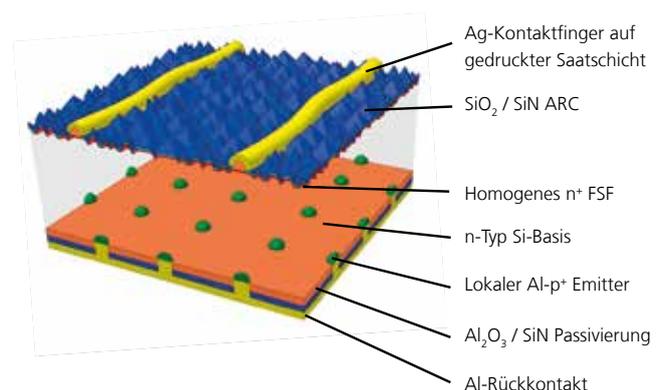
Bei der industriellen Herstellung von Solarzellen wird als Ausgangsmaterial derzeit überwiegend p-Typ Silicium verwendet. Zwar hat n-Typ Si die besseren elektrischen Eigenschaften, doch gibt es für p-Typ Si den am stärksten etablierten Technologiestandard für die Zellfertigung. Die Kombination der bereits verbreiteten Produktionsprozesse mit n-Typ Material ermöglicht neue, vielversprechende Wege für einfach herzustellende hocheffiziente Solarzellen. Anders als bereits im Markt befindliche, nach aufwendigen Verfahren auf n-Typ Si gefertigte Zellstrukturen, eröffnen am Fraunhofer ISE entwickelte Konzepte nun einen kosteneffizienten Einstieg in die Produktion von n-Typ Si-Solarzellen.

Markus Glatthaar, Michael Rauer, **Christian Schmiga**, Annika Tuschinsky, Stefan Glunz

Die meisten weltweit verkauften Solarzellen werden aus kristallinem p-Typ Silicium (Si) hergestellt. Dabei wirkt das Material bereits heute bei guten Industriezellen limitierend. Die derzeit höchsten Wirkungsgrade werden mit auf dem qualitativ höherwertigen n-Typ Si gefertigten Zellstrukturen erreicht, wobei jedoch spezielle bzw. aufwendige Verfahren zum Einsatz kommen.

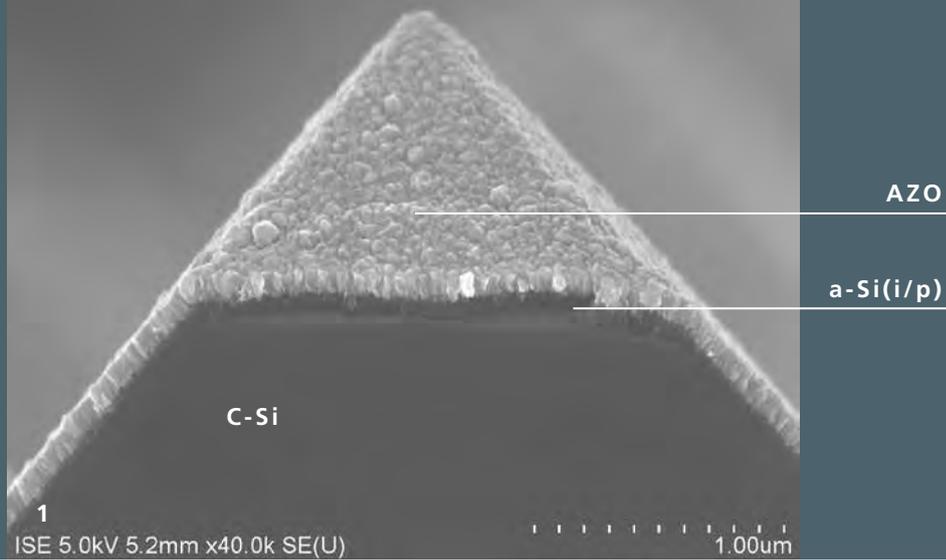
Die am Fraunhofer ISE entwickelten, einfach umsetzbaren Zellkonzepte kombinieren die bewährte Herstellungstechnologie für p-Typ Si-Solarzellen mit n-Typ Si-Material. Entscheidend sind dafür Aluminium (Al) -dotierte p⁺ Schichten als Emitter auf der Rückseite der Zelle. Diese werden aus siebgedruckten Al-haltigen Metallpasten bei einem kurzen Hochtemperatur-Feuerschritt durch Einlegieren in die Si-Oberfläche erzeugt und bilden in konventionellen p-Typ Zellen das Al-Rückseitenfeld (Back Surface Field, BSF). Der Einsatz Al-legierter Emitter ermöglicht so die Herstellung hocheffizienter n-Typ Zellen auf Basis etablierter Produktionsprozesse.

1 Großflächige, am Fraunhofer ISE hergestellte n-Typ Si-Solarzelle mit rückseitigen Al-Emitterpunkten und beidseitig gedruckten Kontakten.



2 Schema unserer n-Typ Si-Solarzelle mit rückseitigen Al-Emitterpunkten. Für die Zellfertigung kann die von p-Typ Zellen bekannte PERC-Technologie ohne wesentliche Veränderungen übernommen werden.

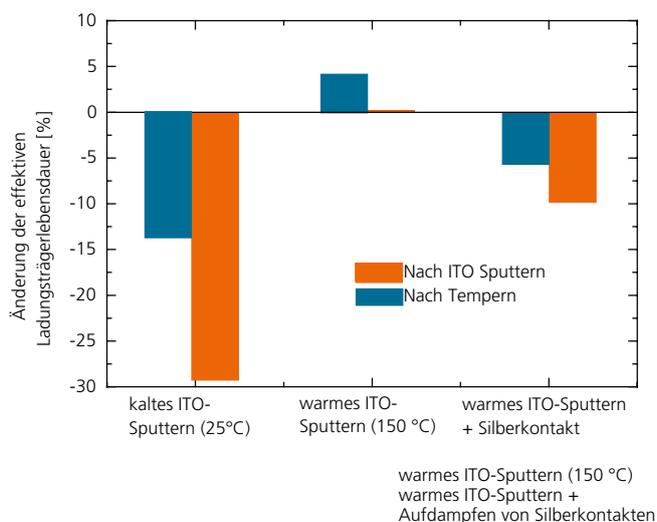
Überträgt man die von p-Typ Si-Solarzellen bekannte PERC (Passivated Emitter and Rear Cell)-Technologie auf n-Typ Si-Material, so ergibt sich damit eine Zellstruktur, die viele kleine lokale Al-Emitterbereiche, die in die passivierte Si-Oberfläche auf der Zellrückseite einlegiert sind, aufweist (Abb. 2). Mit am Fraunhofer ISE weiterentwickelten Al-Pasten konnten die strukturellen und elektrischen Eigenschaften dieser punkt- oder linienförmigen Emitter deutlich verbessert werden. Als Ergebnis erreichen unsere ersten auf diese Weise gefertigten großflächigen (144 cm²) n-Typ Zellen (Abb. 1) bereits einen Spitzen-Wirkungsgrad von 19,7%.



PRODUKTIONSTECHNOLOGIE FÜR SILICIUM-HETEROSOLARZELLEN

Silicium-Heterosolarzellen sind Wafer-basierte Solarzellen mit einem Wirkungsgradpotenzial von über 24%. In diesem Solarzellentyp werden dünne Schichten aus amorphem Silicium (a-Si) zur Oberflächenpassivierung und zur Herstellung der selektiven Kontakte auf Vorder- und Rückseite genutzt. Die Funktionalität dieser Schichten wird im Produktionsprozess sehr stark durch die Qualität vor- und nachgeschalteter Prozesse beeinflusst. Es ist daher wichtig, ihre Wirkung auf die Zelleffizienz zu evaluieren und zu optimieren.

Martin Bivour, **Dietmar Borchert**, Lena Breitenstein, **Martin Hermle**, Stefan Hohage, Sven Holinski, Jan Jeurink, Laurent Kroely, Britt-Marie Meiners, Anamaria Moldovan, Jochen Rentsch, Kurt Ulrich Ritzau, Petra Schäfer, Winfried Wolke, **Martin Zimmer**, Karin Zimmermann, Stefan Glunz, Ralf Preu



2 Relative Veränderung der effektiven Ladungsträgerlebensdauer, gemessen an beidseitig mit a-Si Schichten passivierten Siliciumscheiden, direkt nach ITO Sputterprozessen und nach Tempern an Luft bei 150 °C für 12 min.

1 Elektronenmikroskopische Aufnahme der Vorderseite einer Silicium-Heterosolarzelle. Zu erkennen sind die Pyramiden auf der Oberfläche, die dünne a-Si Schicht und die Kontaktschicht. Es wurde Aluminium dotiertes Zinkoxid (AZO) statt ITO verwendet.

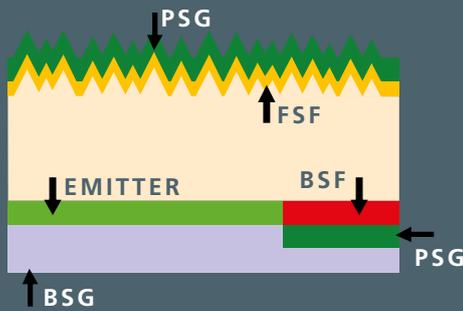
Die elektrische Qualität der Grenzfläche zwischen dem amorphen und kristallinem Silicium ist stark von der Reinigung des Basissubstrats abhängig. Hierfür entwickeln wir neue Prozessrouten basierend auf Ozon, Salzsäure und Flußsäure. Diese deutlich einfacheren und kostengünstigeren Reinigungen erweisen sich einer klassischen Halbleiterreinigungssequenz wie der RCA-Reinigung produktionstechnisch überlegen.

Die Kontaktierung in Heterosolarzellen besteht aus einer durch Sputtern ganzflächig aufgetragenen Indium-Zinnoxidschicht (ITO) plus einem Gitter aus Metallkontakten, das aufgedampft oder gedruckt wird. Der ITO-Sputterprozess hat starken Einfluss auf die Passivierungseigenschaften der darunterliegenden a-Si Schichten. Ein kalter ITO-Prozess reduziert die Passivierungsqualität, was nicht durch Tempern rückgängig gemacht werden kann. Ein warmer Prozess hat keinen Einfluss auf die Passivierungsqualität. Das Aufdampfen von Silberkontakten führt zu einer Abnahme von 5% nach dem Tempern (Abb. 2).

Um bereits vor der Metallisierung die wichtigsten Zelleigenschaften vorhersagen zu können, wurde zur Bewertung der a-Si/TCO-Schichten eine Kombination aus quasistatischer Lebensdauerermessung (QSSPC) und der Messung der externen Spannung bei hohen Beleuchtungsstärken (SunsVoc) etabliert. Diese Messmethodik erlaubt es, die Einflüsse der Dotiereffizienz, der Passivierung der a-Si Schichten sowie den Einfluss der Austrittsarbeit des TCOs auf die spätere Zelleffizienz zu analysieren.

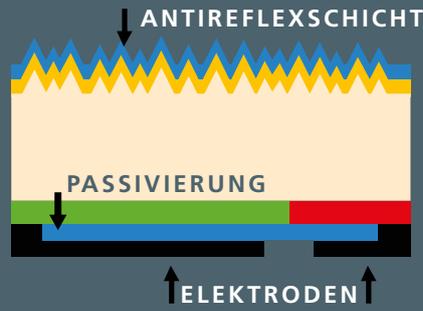
Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

CO-DIFFUSION



1

BC-BJ ZELLE



PROZESSE FÜR INDUSTRIELLE RÜCKSEITEN-KONTAKT-SOLARZELLEN

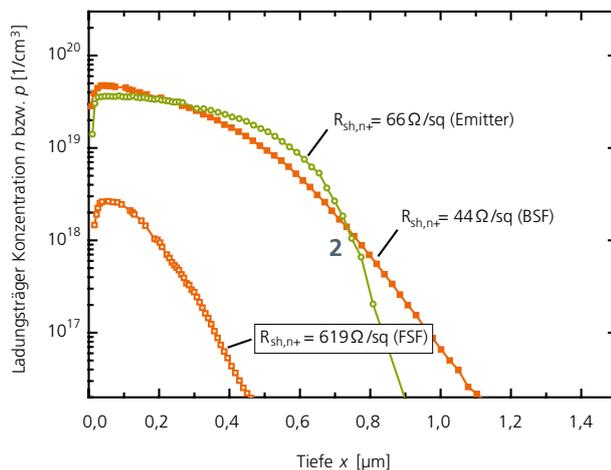
Rückseitenkontakt-Solarzellen haben aufgrund ihres Wirkungsgradpotenzials einen Wettbewerbsvorteil gegenüber anderen Zelltypen, sofern kosteneffiziente Herstellungsprozesse gefunden werden können. Ein Ansatz hierfür sind Co-Diffusionsprozesse, bei denen die Erzeugung aller benötigten Dotierbereiche in einem einzigen Hochtemperaturschritt erfolgt. Zudem werden industriell skalierbare Strukturierungsmethoden benötigt. Die kontaktlose, hochpräzise Inkjet-Technologie bietet hierfür einen vielversprechenden Ansatz. Am Fraunhofer ISE wurden unter Verwendung von Co-Diffusion und Inkjet-Strukturierung kleinflächige Rückkontakt-Solarzellen hergestellt, die Wirkungsgrade von bis zu 20,5% erreichen.

Daniel Biro, Raphael Efinger, David Hahn, Mike Jahn, Roman Keding, Achim Kimmerle, David Stüwe, Benjamin Thaidigsmann, Andreas Wolf, Ralf Preu

Die unterschiedlich dotierten Bereiche einer rückseitensammelnden Rückkontakt (Back Contact Back Junction, BC-BJ)-Solarzelle werden in der Regel durch serielle Gasphasendiffusionen hergestellt. Die resultierenden Prozessketten sind komplex und mit hohen Prozesskosten verbunden. Der am Fraunhofer ISE entwickelte Ansatz ermöglicht die Integration aller Dotierungen in einem Hochtemperaturschritt durch Co-Diffusion aus vorstrukturierten Feststoffdiffusionsquellen (Abb. 1). Als Feststoffdiffusionsquellen werden mittels plasma-unterstützter Gasphasenabscheidung aufgebraachte Bor- bzw. Phosphor-dotierte Silikatgläser (BSG bzw. PSG) verwendet, die eine präzise Einstellung der Dotierstoff-Konzentration in Silicium ermöglichen (Abb. 2).

Zudem erfordern BC-BJ-Solarzellen hoch aufgelöste Strukturen, die am Fraunhofer ISE mittels der hoch präzisen und skalierbaren Inkjet-Technologie realisiert werden. Das Drucken

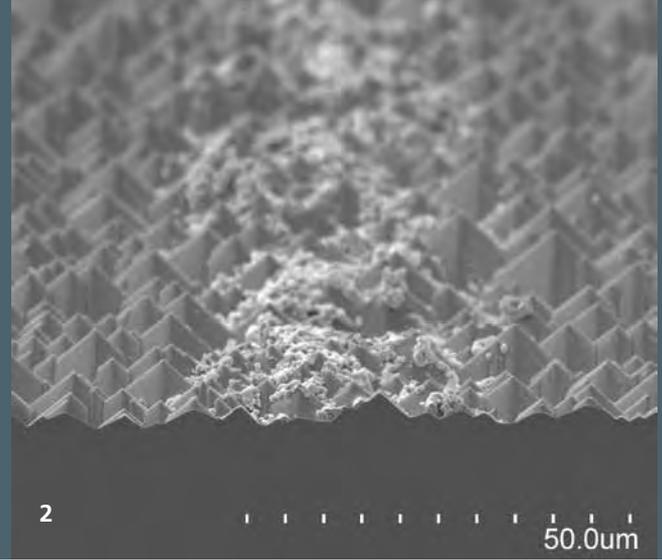
1 Schematische Darstellung der BC-BJ-Zelle während der Co-Diffusion (links) und als fertige Solarzelle (rechts).



2 Konzentrationsprofile und Schichtwiderstände der Dotierungen einer BC-BJ Solarzelle bestehend aus n^+ -Back Surface Field (BSF), n^+ -Front Surface Field (FSF) und p^+ -Emitter. Alle Dotierungen werden in einem einzigen Co-Diffusionsschritt erzeugt. Die hier gezeigten Dotierprofile wurden zudem einem weiteren Hochtemperaturschritt (drive-in) unterzogen.

von ätzresistenten Tinten kombiniert mit nasschemischen Ätzprozessen erlaubt die Herstellung von Strukturen mit einer Strukturbreite von unter 50 μm . Das kontaktlose Prozessieren gestattet zudem die Verwendung von sehr dünnen Wafern, so dass Materialkosten eingespart werden können.

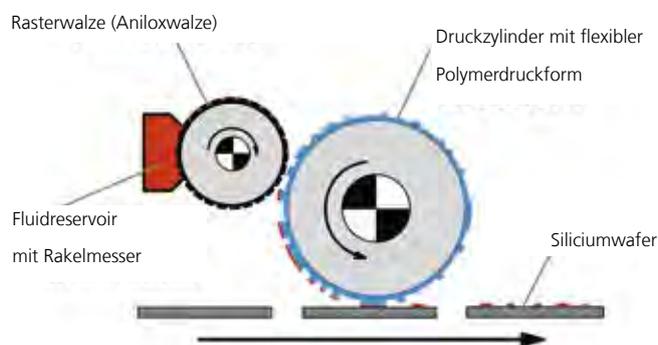
In erster Generation wurden mit Co-Diffusion und Inkjet-Strukturierung BC-BJ-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 20,5% hergestellt (Aperturfläche 4 cm^2). Zukünftige Arbeiten haben zum Ziel, die Prozesse auf großformatige Solarzellen zu übertragen und den Herstellungsablauf weiter zu vereinfachen.



HOCHDURCHSATZ-METALLISIERUNG MIT ROTATIVEN DRUCKVERFAHREN

Zur Entnahme des Stroms werden auf der Solarzelle Metallkontakte aufgebracht. Die Anforderungen an das dazu eingesetzte Druckverfahren sind hoch: Feinste Silber-Kontaktfinger auf der Vorderseite sollen möglichst wenig aktive Zellfläche abschatten, gleichzeitig jedoch eine hohe Leitfähigkeit gewährleisten. Der kosteneffiziente Einsatz von Silber spielt dabei eine zentrale Rolle. Industriell wird die Metallisierung der Solarzelle zumeist im Siebdruckverfahren realisiert – ein seit Jahrzehnten etabliertes, jedoch im Durchsatz begrenztes Druckverfahren. Rotationsdruckverfahren haben das Potenzial, sowohl den Durchsatz deutlich zu steigern, als auch den Silberverbrauch zu reduzieren.

Jonas Bartsch, Daniel Biro, Florian Clement, Denis Erath, Andre Kalio, Michael Linse, **Andreas Lorenz**, Ralf Preu



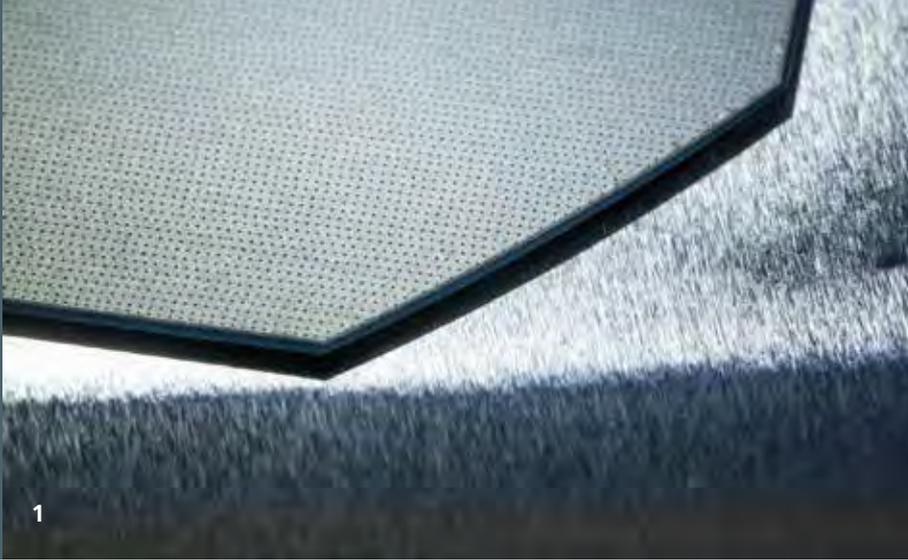
3 Schematische Darstellung des Flexodruckverfahrens: Eine gravierte Rasterwalze überträgt ein definiertes Volumen des Druckfluids auf die flexible Druckform und von dort direkt auf den Siliciumwafer.

1 Solarzelle (Format: 156 x 156 mm²) mit Saatschichtmetallisierung im Flexodruckverfahren.

2 Querschliff und REM-Aufnahme einer im Flexodruck aufgetragenen Silber-Saatschicht (Breite ~25 µm).

Einen sehr vielversprechenden Ansatz als Alternative zum Siebdruck bietet der Einsatz von Rotationsdruckverfahren. Diese Verfahren werden in zahlreichen Industriebereichen für die hochpräzise Übertragung von Druckfarben und Fluiden auf Substrate aller Art eingesetzt. Rotative Druckverfahren zeichnen sich durch hohen Durchsatz und damit eine hohe Produktivität sowie höchste Präzision und Reproduzierbarkeit hinsichtlich des Druckergebnisses aus. Moderne Rolle-zu-Rolle-Rotationsdruckmaschinen erreichen eine Druckgeschwindigkeit von 600 m/min und mehr. Für die Solarzellen-Metallisierung sind Durchsätze im Bereich von 5 000 bis 10 000 Wafern/h denkbar. Rotationsdruckverfahren können beispielsweise hochpräzise Saatschichten für eine anschließende galvanische Verstärkung basierend auf Kupfer übertragen. Im Vergleich zum Siebdruckverfahren können der Silberverbrauch und somit die Prozesskosten reduziert werden.

Der Vollaufbau von Vorderseitenkontakten mit rotativen Druckverfahren sowie der Einsatz rotativer Druckverfahren zum Übertrag von funktionalen Medien stehen ebenfalls im Fokus aktueller Arbeiten. Ein für die Vorderseitenmetallisierung besonders geeignetes Rotationsdruckverfahren ist der sogenannte Flexodruck. Dabei handelt es sich um ein Hochdruckverfahren, bei dem erhöhte Bereiche auf einer flexiblen Druckform das Druckfluid auf den Siliciumwafer übertragen. Mit diesem Verfahren lassen sich feinste Fingerstrukturen mit einem hohen Durchsatz realisieren (Fingerbreiten von 25 µm wurden demonstriert). Darüber hinaus werden weitere Rotationsdruckverfahren evaluiert.



1

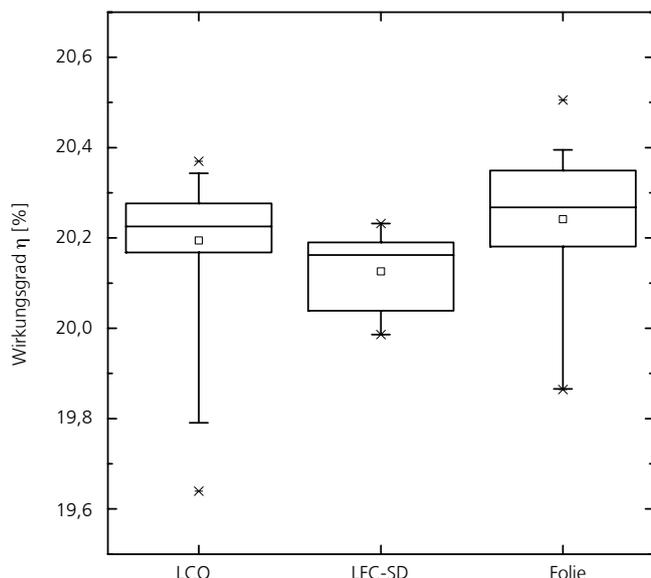
INNOVATIVE FOLIENELEKTRODE FÜR PASSIVIERTE SOLARZELLEN

Im Vergleich zu konventionellen Zellen ermöglichen Solarzellen mit passivierter Rückseite höhere Wirkungsgrade. Deswegen wird diese Technologie weltweit in Pilotfertigungen erprobt und vereinzelt bereits in die Massenfertigung überführt. Zusätzliche Prozessschritte, die sensibel miteinander wechselwirken, machen sie aber komplexer und teurer, so dass ihr Kostenvorteil trotz höherer Zelleffizienzen gering ist. Eine am Fraunhofer ISE entwickelte Technologie, bei der konventionelle Aluminiumfolie mittels Laserstrahlung mit dem Siliciumwafer verschweißt wird, vereinfacht den Herstellungsprozess von rückseitenpassivierten Zellen signifikant. Sie bietet ein höheres Effizienzpotenzial und ist gleichzeitig deutlich günstiger. Im Projekt »FolMet« wird diese Technologie zur Serienreife entwickelt.

Martin Graf, Jan Nekarda, Ralf Preu

Die Verwendung konventioneller Aluminiumfolie ist ein im Vergleich zum Standard-Siebdruck deutlich schonenderes Verfahren zur Metallisierung der Rückseite von rückseitenpassivierten Solarzellen. Diese wird mittels einzelner Laserpulse durch die Passivierschicht legiert und mit dem Silicium verschweißt. Diese Kontaktpunkte stellen die mechanische und elektrische Verbindung zwischen Folienelektrode und Siliciumbasis her. Das Verfahren ermöglicht einen um bis zu $0,3 \text{ mA/cm}^2$ höheren Kurzschlussstrom der Zellen aufgrund verbesserter optischer Eigenschaften. Zudem wird der Serienwiderstandsbeitrag gesenkt, da näher an den Waferand heran metallisiert werden kann und die Folie eine höhere Querleitfähigkeit besitzt. Neben einer deutlich verbesserten Zelleffizienz bietet die Folienmetallisierung zusätzlich einen deutlichen Kostenvorteil, da die Materialkosten für die Elektrode um bis zu 90% gesenkt werden und darüber hinaus, verglichen mit dem Standardverfahren mindestens ein Einzelprozessschritt eingespart werden kann. Im Projekt

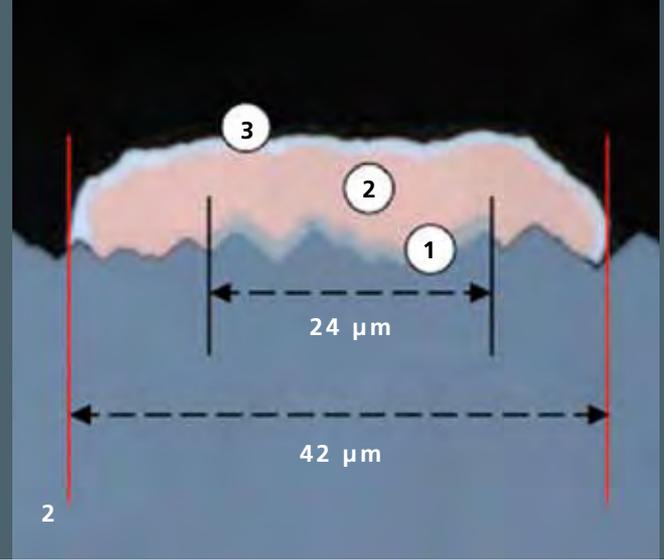
1 Dielektrisch passivierte und mittels Aluminiumfolie metallisierte Rückseite einer kristallinen Siliciumsolarzelle.



2 Wirkungsgrade von industrienah gefertigten PERC-Solarzellen. Verglichen ist die hier vorgestellte Folienmetallisierung (Folie) mit den im Markt etablierten Verfahren zur Herstellung lokaler Rückseitenkontakte auf Basis einer siebgedruckter Elektrode – LCO (Local Contact Opening) und LFC (Laser Fired Contact). Es wurden pro Gruppe zwischen 15 und 41 Solarzellen aus magnetisch gezogenem Cz-Silicium mit gleich hergestellter Zellvorderseite verwendet.

»FolMet« konnte bereits das gegenüber der Referenz gesteigerte Wirkungsgradpotenzial mit Werten von bis zu 20,5% und die Verschaltbarkeit von Solarzellen mit Folienelektrode erfolgreich demonstriert werden (Abb. 1).

Das Projekt »FolMet« wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.



SOLARMODULE MIT ZELLKONTAKTEN AUS NICKEL UND KUPFER

Silber und Blei sind die zwei kritischsten Materialien bei der Herstellung von Siliciumsolarmodulen. Gründe hierfür sind Kosten, Verfügbarkeit und gesundheitliche Bedenklichkeit. Am Fraunhofer ISE wurde ein mehrstufiger Kontaktierungsprozess entwickelt, der diese Materialien ersetzt. Ein erster Ansatz baut auf der momentan vorhandenen Kontaktarchitektur auf und ergänzt diese durch galvanische Metallabscheidung, wodurch der Silberverbrauch bereits drastisch gesenkt wird. Ein weitergehender Ansatz ersetzt sowohl Silber als auch Blei vollständig, die Vorderseitenkontakte werden galvanisch aus Nickel, Kupfer und Zinn aufgebaut. Beide Ansätze wurden zuletzt erfolgreich auf Modulebene demonstriert.

Jonas Bartsch, Gisela Cimiotti, Markus Glatthaar, Achim Kraft, Andreas Lorenz, Andrew Mondon, Stefan Glunz

Momentan ist der Siebdruck von Silberpasten die Standardmethode zur Kontaktbildung auf Siliciumsolarzellen. Auch wenn der Silberverbrauch hierbei gesenkt werden konnte, ist Silber immer noch ein wichtiger Kostentreiber bei der Solarzellenherstellung. Wenn der Ersatz von Silber durch besser verfügbares und ca. 100mal günstigeres Kupfer gelingt, reduzieren sich diese Kosten und die Anfälligkeit für Preisschwankungen. Die Leistungsfähigkeit der Kontakte bleibt dabei erhalten oder steigt sogar. Galvanisch abgeschiedenes Kupfer ist kompakt und hochleitfähig.

Am Fraunhofer ISE werden Konzepte zur galvanischen Abscheidung von Nickel und Kupfer auf dünn gedruckten Saatschichten sowie direkt auf Silicium verfolgt. Die Kontakthaftung war dabei eine der größten Herausforderungen. In dieser Hinsicht wurden kürzlich deutliche Fortschritte in Zusammenarbeit mit unseren Partnern erzielt. Diese mündeten im Bau zweier Prototyp-Solarmodule mit den oben genannten Techniken zur

1 Solarmodul mit Zellen mit siebgedruckter Saatschicht, galvanisch verstärkt mit Nickel, Kupfer und Silber vor einer Kupfergalvanikanlage am Fraunhofer ISE.

2 Querschnitt durch vollständig galvanisch gewachsenen Solarzellenkontakt aus Nickel (1), Kupfer (2) und Zinn (3).

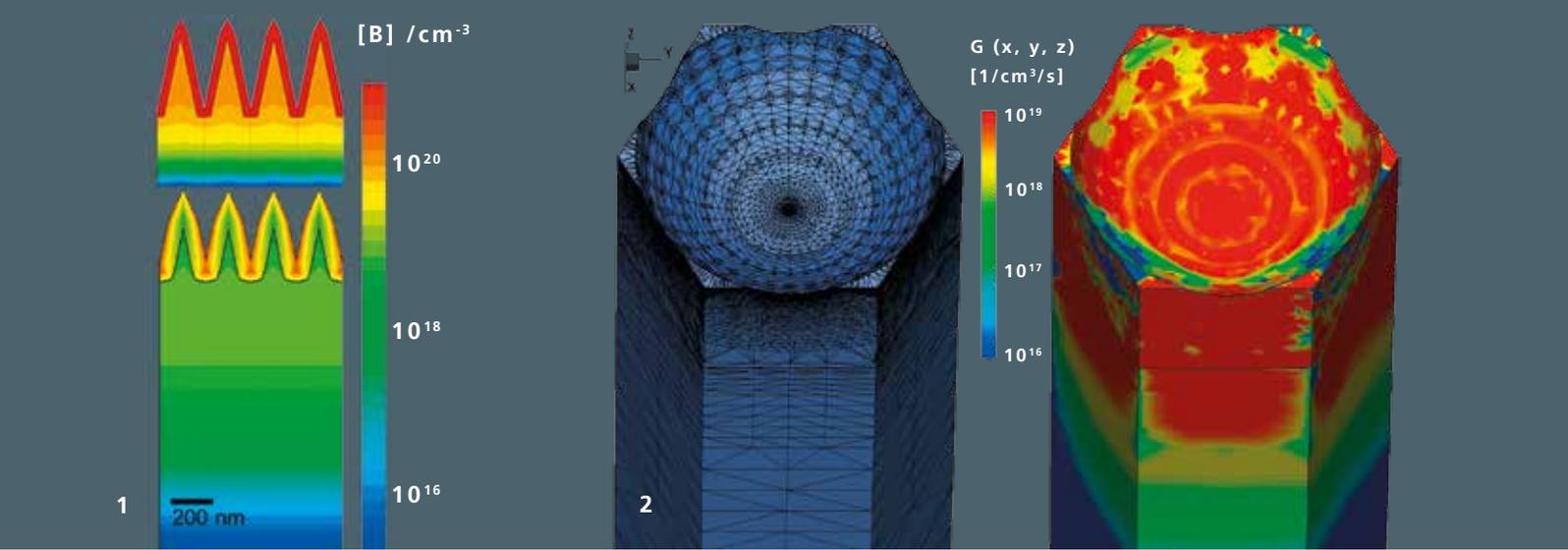
Zellmetallisierung. Bei Verwendung von Standard-Lötverfahren wurden die nötigen Haftungskriterien übertroffen.

Das erste Modul beinhaltet Zellen mit galvanischer Abscheidung von Nickel, Kupfer und Silber auf fein siebgedruckte Saatschichten. Dieser Prozess lässt sich leicht in bestehende Linien implementieren. Der Silberverbrauch der Metallisierung wurde dabei durch einen verbesserten Siebdruck-Prozess (15 mg Pastenübertrag, silberarme Paste) von ca. 120–150 mg auf ca. 13 mg pro Zelle reduziert.

Im zweiten Modul wurden Zellen mit vollständig silber- und bleifreier Zellmetallisierung verwendet. Nickel wurde direkt auf Silicium abgeschieden und haftfest einlegiert, was durch ein detailliertes Verständnis der Festphasenreaktionen zwischen Nickel und Silicium ermöglicht wurde. Das Ergebnis ist vergleichbar zu Hocheffizienzkontakten von Laborsolarzellen oder integrierten Schaltkreisen, allerdings bei niedrigen Kosten und mit hochdurchsatzfähigen Prozessen. Solche Kontakte sind ein vielversprechender Kandidat für künftige Zellkonzepte, z. B. auf n-Typ Silicium.

Die erzielten Ergebnisse erlauben die Adaption solcher kostensparender Prozesse durch Zellhersteller mit relativ geringem Aufwand. Anhand der aufgebauten Expertise kann das Fraunhofer ISE gemeinsam mit seinen Partnern einen solchen Prozess unterstützen.

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.



SIMULATIONSMODELLE FÜR HOCHEFFIZIENTE SOLARZELLENKONZEPTE

Hocheffiziente Solarzellen weisen immer komplexere Strukturen auf. Zugleich hat die Optimierung einzelner Prozessschritte einen starken Einfluss auf den Wirkungsgrad der Solarzelle. Um bei der Entwicklung neuer Solarzellenkonzepte die Anzahl an aufwendigen Experimenten zu begrenzen, nimmt deshalb die Bedeutung von vorhersagenden Simulationen immer mehr zu. Wichtige Bausteine hierfür sind mehrdimensionale numerische Halbleitersimulationen zur Quantifizierung von optischen und elektrischen Solarzeleigenschaften sowie zur Vorhersage von Dotierstoffverteilungen.

Martin Bivour, Johannes Greulich, Martin Hermle, Stefan Rein, Marc Rüdiger, **Jonas Schön**, Sebastian Schröer, Heiko Steinkemper, Wilhelm Warta, Nico Wöhrlé, Ralf Preu, Stefan Glunz

Numerische Simulationen werden gezielt eingesetzt, um das Verständnis von Solarzellenprozessen und physikalischen Abläufen zu erhöhen. Zusammen mit umfangreichen Parametervariationen ermöglichen Simulationsstudien eine sehr gezielte Solarzellenentwicklung. Die seit Jahren kontinuierlich weiter entwickelten und verbesserten Simulationswerkzeuge und Modelle sind immer besser in der Lage, präzise Vorhersagen für das reale Solarzellenverhalten zu liefern und neuesten technologischen Entwicklungen schneller zur Marktreife zu verhelfen.

Die Erweiterung und Kalibrierung von Diffusions-, Präzipitations- und Implantationsmodellen für Bor und Phosphor mittels Dotierprofilmessungen ermöglicht eine präzise Vorhersage von ein- und mehrstufigen Dotierprozessen. So konnte die Simulation der Bor-Implantation und des anschließenden Hochtemperatur-Ausheilschritts unter Berücksichtigung der Bildung und Auflösung von Bor-Präzipitaten dafür genutzt werden, neuartige Implantationsprozesse für die Emitter-

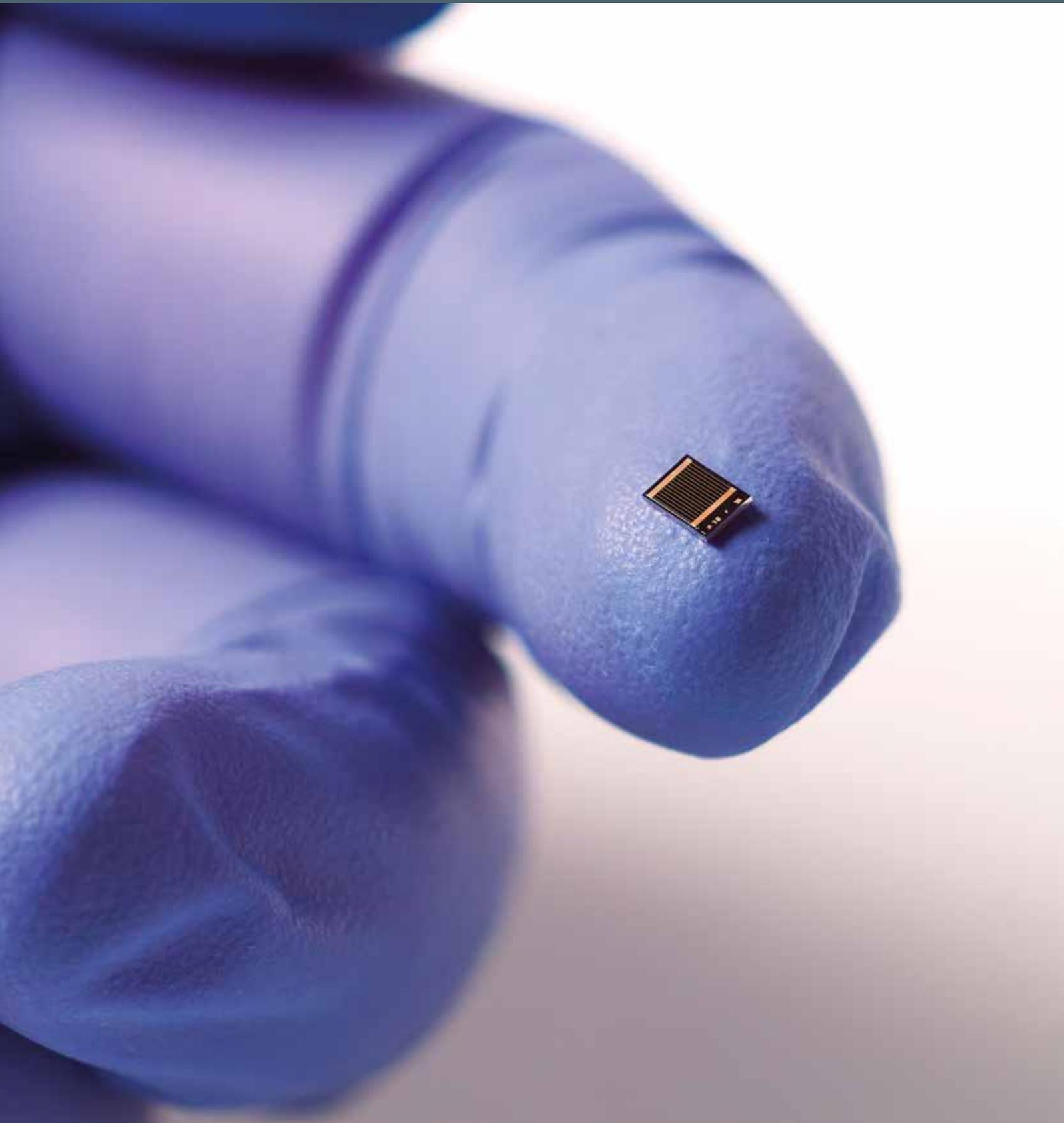
- 1 Simulation eines Bor-Emitters auf Siliciumwafern mit »black silicon« Textur nach BBr_3 -Dotierprozess mit (unten) und ohne (oben) zusätzlicher Oxidation.
- 2 Symmetrieelement und Rechengitter (links) sowie simulierte optische Generation (rechts) für monochromatische Beleuchtung ($\lambda = 0.7 \mu\text{m}$) mit Licht einer Intensität von 0.1 W/cm^2 für eine Honigwabentextur.

herstellung von Solarzellen auf Basis von n-typ Silicium zu entwickeln. Für die Simulationen der Bor-Diffusion in Silicium mit nadelförmiger Oberfläche und daher hervorragenden optischen Eigenschaften (»black silicon«) wurde u. a. das Borsilikatglas- und Siliciumoxidwachstum berücksichtigt (Abb. 1).

Im Bereich der optischen Eigenschaften helfen Simulationsmodelle die Entwicklungspotenziale verschiedener Texturen zu bewerten und weiter zu optimieren. So lässt sich z. B. durch dreidimensionale Simulationen von sogenannten Honigwabentexturen die verbesserte Lichteinkopplung dieser neuartigen Vorderseitentextur quantifizieren (Abb. 2).

Hocheffiziente amorph / kristalline Silicium-Heterosolarzellen sind von ihrer Struktur nahezu eindimensionale Solarzellen und aus dieser Sicht auch eindimensional simulierbar. Allerdings kommt es zu einer starken Interaktion zwischen den einzelnen Schichten und die Beschreibung des Ladungsträgertransports über die einzelnen Schichtgrenzen hinweg mit klassischen Transportmodellen erweist sich als nicht ausreichend. Erst die Berücksichtigung quantenmechanischer Tunnelmechanismen zwischen dem TCO (Transparent Conductive Oxide) und den dotierten a-Si Schichten erlaubt es, den sehr starken Einfluss der Dotiereffizienz der a-Si Schicht und der Austrittsarbeit des TCOs auf die Kennlinie der Solarzelle richtig zu beschreiben und daraus Schlüsse für die Optimierung der Schichten zu ziehen.

III-V- UND KONZENTRATOR-PHOTOVOLTAIK



Das Fraunhofer ISE adressiert mit diesem Geschäftsfeld Anforderungen, die sich aus dem Weltraum- und dem terrestrischen Photovoltaikmarkt ergeben. Satelliten im Weltraum werden heute praktisch ausschließlich mit hocheffizienten III-V Mehrfachsolarzellen bestückt! Aufgrund der besonderen Bedingungen im Weltraum – wie der Beschuss des Materials mit hochenergetischen Elektronen und Protonen sowie die kostenintensive Beförderung der Satelliten in den Weltraum – entwickeln wir neue Solarzellenarchitekturen, die noch höhere Wirkungsgrade bei noch geringerem Gewicht erzielen. Auch bei der Anwendung von Konzentratorsolarzellen auf der Erde in hochkonzentrierenden Photovoltaiksystemen bestimmen hohe Wirkungsgrade und Kostensenkung bei den Produktionsprozessen die Forschungsansätze. Der terrestrische, hochkonzentrierende PV-Markt wächst seit Jahren. Entscheidend dazu beigetragen hat Concentrix Solar – heute Soitec Solar –, eine Ausgründung des Fraunhofer ISE aus dem Jahr 2005.

Um höhere Wirkungsgrade und geringere Kosten zu erreichen, optimieren wir Prozesstechnologien, entwickeln Materialien und erarbeiten neue Fertigungstechnologien. Beispielsweise untersuchen wir für monolithisch gewachsene 5- und 6fach Solarzellen das Materialsystem GaInNAs und Al-haltige ternäre und quaternäre III-V Halbleiter. Mit spannungskompensierten Multi-Quantum Wells arbeiten wir, um in Mehrfachsolarzellen eine bessere Stromanpassung zu erreichen. Für das metamorphe Wachstum von Schichten – hierbei wird Material mit unterschiedlichen Gitterkonstanten gewachsen – entwerfen wir geeignete Pufferstrukturen, auf denen wir hochqualitative Solarzellenstrukturen realisieren. Ein Beispiel für den Einsatz solcher Strukturen ist das Wachstum von Mehrfachsolarzellen auf Silicium.

Das Wafer-Bonding-Verfahren ist ein weiteres wichtiges Technologiethema. Hierbei werden Halbleiterschichten miteinander verbunden. Dies ermöglicht uns, unterschiedliche Halbleiter wie GaSb, GaAs, InP, Si oder Ge zu kombinieren. Im Oktober 2013 erzielten wir mit einer Wafer-gebondeten Vierfach-Solarzelle den Weltrekordwirkungsgrad von 44,7%. Die Rekordzelle wurde gemeinsam mit den Partnern Soitec Solar, CEA-Leti und Helmholtz-Zentrum Berlin entwickelt (Seite 49).

Eine besondere Anwendung von III-V Photovoltaikzellen ist der Einsatz unter monochromatischer Bestrahlung mittels LED oder Laser. Hier können sehr hohe Wandlungswirkungsgrade erzielt werden, so dass solche Photovoltaikzellen in kabellosen Energieversorgungssystemen zum Einsatz kommen (Seite 52).

Um die III-V Mehrfachsolarzellen auch terrestrisch zu nutzen, entwickeln wir hochkonzentrierende Photovoltaiksysteme. Dazu untersuchen und qualifizieren wir optische Komponenten, die das Sonnenlicht um den Faktor 300–1000 konzentrieren, bevor es in der III-V Mehrfachsolarzelle in elektrische Energie gewandelt wird (Seite 51). Das von uns entwickelte FLATCON®-Modul ist ein Beispiel hierfür. Wir optimieren es kontinuierlich weiter, um höhere Wirkungsgrade und niedrigere Fertigungskosten zu erzielen. Im ConTEC (Concentrator Technology and Evaluation Center) untersuchen wir Modulfertigungsprozesse und -zuverlässigkeit. Unsere Kompetenzen im Bereich der thermischen, optischen und elektrischen Simulation stellen wir Kunden zur Verfügung. Wir optimieren und entwickeln Prozesse und innovative Systeme.

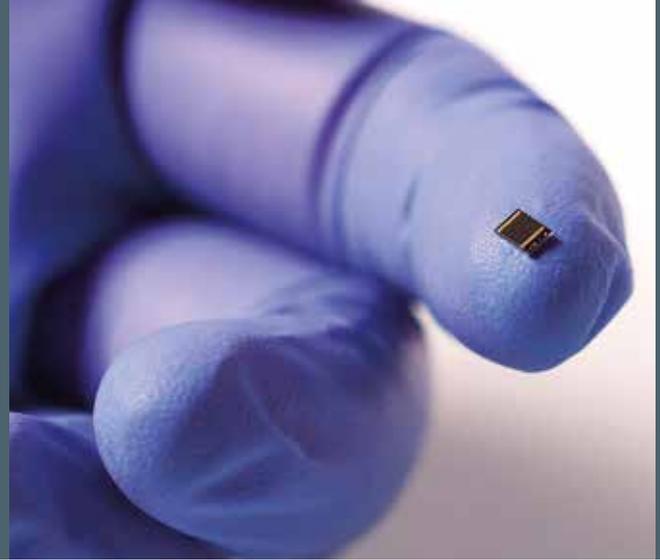
Neben der hochkonzentrierenden Photovoltaik auf Basis von III-V Mehrfachsolarzellen arbeiten wir an niedrigkonzentrierenden Systemen (Seite 50). Diese decken den Konzentrationsbereich von Faktor 2 bis 30 ab. Hier bieten wir unseren Kunden Zusammenarbeit bei der Entwicklung von optischen Konzentratoren, bei der Montage von Solarzellen, bei der Auslegung und Vermessung von Systemen an. Für den Einsatz in niedrigkonzentrierenden Systemen haben wir spezielle Si-Solarzellen entwickelt. Im PV-TEC (Photovoltaik-Technologie Evaluations Center) können auch Serien für spezielle Kundenanwendungen produziert werden.

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	75
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	62
Zeitschriften- und Buchbeiträge	26
Vorträge und Konferenzbeiträge	33

www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/20



Weltrekordsolarzelle mit 44,7% (@297xAM1.5d) Wirkungsgrad, bestehend aus vier Teilsolarzellen auf Basis von III-V Halbleitern, für die Anwendung in der Konzentration-Photovoltaik.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Andreas Bett

Telefon +49 761 4588-5257
andreas.bett@ise.fraunhofer.de

III-V Epitaxie und Solarzellen

Dr. Frank Dimroth

Telefon +49 761 4588-5258
cpv.III-V@ise.fraunhofer.de

Konzentrator-Bauelemente

Maike Wiesenfarth M. Sc.

Telefon +49 761 4588-5470
cpv.assemblies@ise.fraunhofer.de

Konzentrator-Optik

Dr. Peter Nitz

Telefon +49 761 4588-5410
cpv.optics@ise.fraunhofer.de

Hochkonzentrierende Systeme (HCPV)

Maike Wiesenfarth M. Sc.

Telefon +49 761 4588-5470
cpv.highconcentration@ise.fraunhofer.de

Niedrigkonzentrierende Systeme (LCPV)

Maike Wiesenfarth M. Sc.

Telefon +49 761 4588-5470
cpv.lowconcentration@ise.fraunhofer.de

Silicium-Konzentratorsolarzellen

Dr.-Ing. Daniel Biro

Telefon +49 761 4588-5246
cpv.silicon@ise.fraunhofer.de



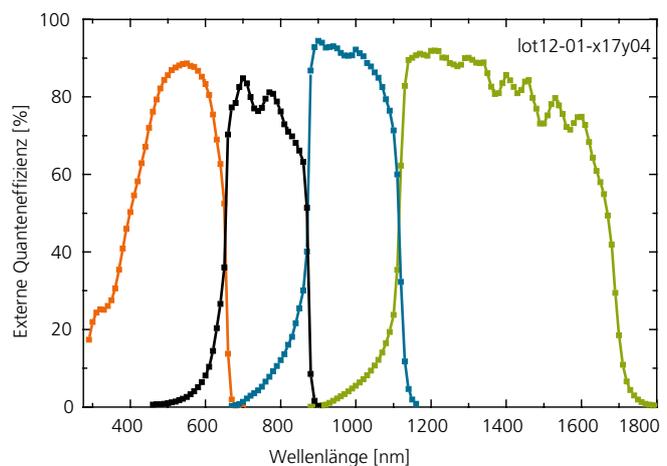
HÖCHSTEFFIZIENTE III-V MEHRFACHSOLARZELLEN MITTELS WAFER-BONDEN

Strom ist eine der wertvollsten und am flexibelsten einsetzbaren Energiequellen in unserer modernen Gesellschaft. Je effizienter wir diesen Strom aus erneuerbaren Energien gewinnen, um so weniger Fläche und Material wird benötigt. Wir entwickeln gemeinsam mit Soitec S.A. sowie den Forschungspartnern am Helmholtz-Zentrum Berlin und dem CEA-Leti in Grenoble, Technologien für modernste Mehrfachsolarmodule und erreichen dabei Wirkungsgrade bis 44,7%. Einsatz finden diese Spezialsolarzellen unter hochkonzentriertem Sonnenlicht, z. B. in den Konzentratorsystemen von Soitec.

Paul Beutel, **Frank Dimroth**, Elvira Fehrenbacher, Ulrich Fiedeler, Matthias Grave, Christian Karcher, Karin Mayer, Eduard Oliva, Michael Schachtner, Manuela Scheer, Inessa Semke, Gerald Siefer, Thomas Tibbits, Katrin Wagner, Alexander Wekkeli, Andreas Bett

Mehrfachsolarmodule spalten das Sonnenlicht auf mehrere Teilsolarzellen auf, die jeweils einen anderen Spektralbereich absorbieren und sehr effizient in elektrische Energie wandeln. Wichtig ist, in diesen Höchstleistungssolarzellen die besten Materialeigenschaften zu vereinen. Die Expertise des Fraunhofer ISE liegt auf der Epitaxie von komplexen III-V Verbindungshalbleiterstrukturen. Beispiele dieser Materialien sind Galliumarsenid, Galliumindiumphosphid oder Indiumgalliumarsenid. Wir setzen modernste Epitaxieanlagen mit hohem Durchsatz ein und entwickeln industriekompatible Prozesse zur Herstellung von komplexen III-V Schichtstrukturen. Kristalle, die aufgrund unterschiedlicher atomarer Abstände nicht aufeinander passen, werden bei den Projektpartnern am CEA-Leti bzw. bei Soitec in einem sogenannten »Wafer-

- 1 In einer Epitaxie-Anlage werden die III-V Halbleiterschichten für die Solarzellen abgeschieden.
- 2 Hunderte von kleinen Vierfachsolarmodulen aus GaInP/GaAs/GaInAsP/GaInAs werden auf einem Substrat prozessiert und später in photovoltaischen Konzentratormodulen eingesetzt.



- 3 Externe Quanteneffizienz der entwickelten Vierfachsolarmodule mit einem Wirkungsgrad von 44,7%.

Bonding«-Prozess vereint. So konnten wir gemeinsam eine Vierfachsolarmodule aus einer Galliumarsenid und einer Indiumphosphid basierten Kristallstruktur herstellen und damit die effizienteste Solarzelle der Welt realisieren. Diese Solarzelle erreicht einen Wirkungsgrad von 44,7% bei einer 297fachen Konzentration des Sonnenlichts (Abb. 3).

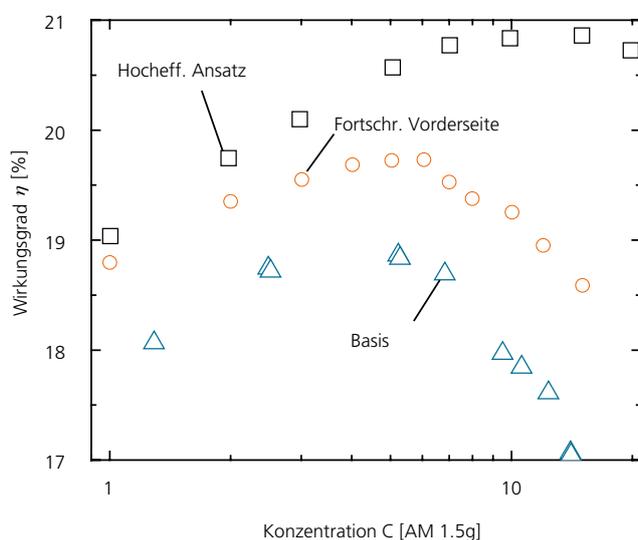


NIEDRIGKONZENTRIERENDE PV (LCPV): Si-SOLARZELLEN UND RECEIVER

Für LCPV-Systeme werden auf die jeweilige Einstrahlung modifizierte Siliciumsolarzellen eingesetzt. Wir entwickeln rückseitenkontaktierte Si-Solarzellen, die weniger Abschattungsverluste durch die Vorderseitenmetallisierung aufweisen. Dadurch erreichen wir Wirkungsgrade bis zu 21% bei 15facher Sonnenkonzentration. Zudem gehört die Integration und Verschaltung der Solarzellen in Receivern und die Auslegung und Bereitstellung der Optik für die Konzentration der Solarstrahlung zu unseren Forschungsgebieten. Damit bieten wir komplette Systemlösungen oder -integration an.

Daniel Biro, Florian Clement, Matthieu Ebert, Ulrich Eitner, Tobias Fellmeth, **Ingrid Hädrich**, **Maike Wiesenfarth**, Andreas Bett, Ralf Preu, Harry Wirth

In LCPV-Systemen wird mit angepassten Siliciumsolarzellen kostengünstig Strom produziert. Ein Konzentratorsystem besteht aus konzentrierender Optik und dem Receiver, in dem die Solarzellen so verschaltet und verkapselt sind, dass hohe elektrische Effizienz, gute Wärmeleitung und ein hinreichender



1 Wafer mit mehreren MWT-Solarzellen (oben Vorderseite, unten Rückseite). Das modulare Design erlaubt den Einsatz speziell zugeschnittener Solarzellen, die sich aus einem Vielfachen der Einheitszelle ($1 \times 2,25 \text{ cm}^2$) zusammensetzen (Beispiele: rote Umrandung).

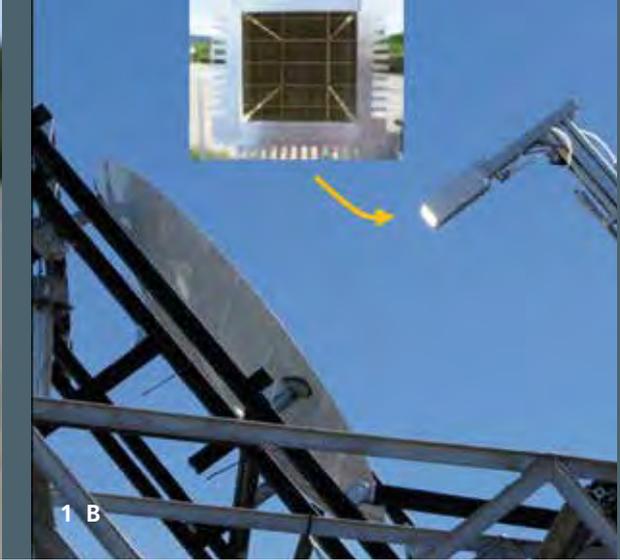
2 Receiver mit elektrisch verschalteten und verkapselten MWT-Solarzellen.

Schutz gegen Umwelteinflüsse gegeben ist. Die Systemauslegung kann unterschiedlich sein, z. B. werden Spiegel- oder Linsenoptiken unterschiedlicher Größen verwendet, die dann ein- oder zweiachsig der Sonne nachgeführt werden. In jedem Systemdesign müssen die Komponenten sorgfältig aufeinander abgestimmt sein. Für niedrige Konzentrationen von 2- bis 30fach haben wir ein flexibles, modular aufgebautes Solarzellendesign für eine auf Industrieanlagen hergestellte »Metal Wrap Through« (MWT) Si-Solarzelle (Abb. 1) entwickelt. Damit können wir die Größe der Solarzelle schnell auf individuelle Systeme anpassen und zugleich vereinheitlichte Charakterisierungs- und Verschaltungsverfahren nutzen.

Abb. 2 zeigt einen Receiver, der u. a. in einer Parabolrinne mit einer Konzentration bis ca. 25fach eingesetzt werden kann. Bei dieser Entwicklung profitieren wir von unserer Erfahrung aus der PV-Flachmodultechnologie und der hochkonzentrierenden Modultechnologie. Soweit möglich verwenden wir Standardproduktionsprozesse dieser Technologien und passen sie für die Herstellung von Prototypen und Kleinserien an.

Wir verfolgen dabei mehrere technologische Richtungen. Zum einen wollen wir kosteneffizientere Prozesse (Basis) erzielen, und zum anderen komplexere Ansätze für die Vorderseite und den Einsatz von hochwertigen Si-Substraten (Hocheffizienz) umsetzen, die zu höheren Wirkungsgraden führen (Abb. 3).

3 Wirkungsgrade von Si-Solarzellen in Abhängigkeit der Konzentration für verschiedene Zelltechnologien.



CONCENTRATOR PV AND THERMAL (CPVT): SYSTEM- UND RECEIVER-ENTWICKLUNG

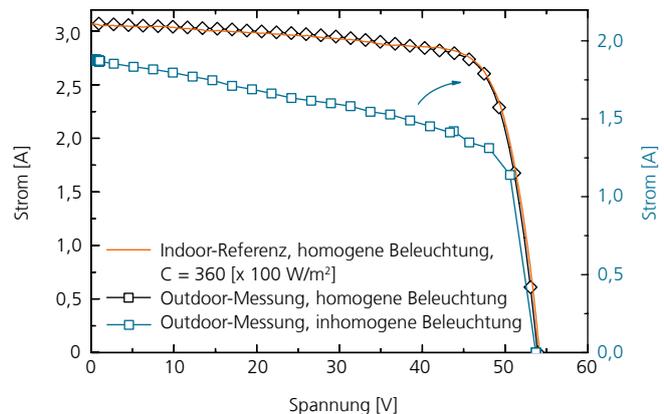
CPVT-Systeme erzeugen neben elektrischer Energie auch thermische Energie, so dass das Sonnenlicht in solchen Systemen mit einer Effizienz von 80% energetisch genutzt wird. Für CPVT-Systeme mit hohen Konzentrationsfaktoren sind aktiv gekühlte Solarzellenmodule eine Voraussetzung. Wir entwickeln verschiedene Bauarten für diese Module und implementieren Sekundäroptiken, um eine homogene Verteilung des konzentrierten Sonnenlichts zu erreichen. Unter realen Betriebsbedingungen analysieren wir diese Prototypen.

Armin Bösch, Alexander Dilger, Tobias Dörsam, Sebastian Gamisch, Henning Helmers, Wei Yi Thor, **Maïke Wiesenfarth**, Andreas Bett

In hochkonzentrierenden Systemen setzt man neben Linsen auch Spiegeloptiken ein. Bei paraboloidförmigen Spiegelsystemen mit einer Fläche von mehreren Quadratmetern müssen die Solarzellen aktiv gekühlt werden. Damit kann neben der elektrischen Energie auch die thermische Energie genutzt werden. In solchen CPVT genannten Systemen wird die Sonnenenergie mit einem Wirkungsgrad von bis zu 80% umgewandelt.

Die Herausforderung für solche Systeme besteht in der Auslegung des Sonnenlichtempfängers, dem Compact Concentrator Module (CCM). Hier platzieren wir mit hoher Packungsdichte eine Vielzahl von Solarzellen mit einer Fläche von 1 bis 5 cm² auf einem Kühler. Unsere Schwerpunkte bei der Entwicklung solcher CCMs liegen bei der Produktionstechnologie, der Integration von Bypassdioden, neuen Verkapselungsmethoden, Langzeitstabilität und neuen Zellstrukturen für hocheffiziente, großflächige Solarzellen. Unsere unterschiedlichen CCMs qualifizieren und analysieren wir im Außenteststand unter realen Umgebungsbedingungen. Bei einer Verschaltung der Solarzellen in Serie ist eine homogene

1 Vom Fraunhofer ISE entwickelte und untersuchte Konzentratormoduldesigns (CCM) für die Anwendung in CPVT-Systemen: CCM mit alternativem Kühlerdesign und vier MIM-Solarzellen mit einer Größe von jeweils 4,4 cm² (MIM – monolithisch verschaltetes Modul) (A); CCM mit Sekundäroptik montiert auf unserem Außenteststand (B).



2 Strom-Spannungskennlinien eines Konzentratormoduls unter homogener Einstrahlung Indoor und Outdoor im Spiegelsystem (mit homogenisierender Optik) und inhomogener Beleuchtung Outdoor (ohne Homogenisierer). Im Vergleich zu homogener Beleuchtung entstehen bei inhomogener Beleuchtung Verluste durch Überstrahlung an den Receiverseiten und im Füllfaktor durch die Serienschaltung von Solarzellen auf dem Receiver.

Bestrahlung der Modulfläche notwendig. Dazu haben wir eine homogenisierende Optik entwickelt. Das Messergebnis in Abb. 2 zeigt, dass die Verluste durch Überstrahlung und durch ungleiche Stromgeneration der Solarzellen in Serie durch den Homogenisierer vermieden werden.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.

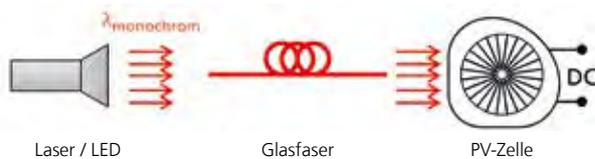


PHOTOVOLTAISCHE ZELLEN FÜR DIE OPTISCHE LEISTUNGSÜBERTRAGUNG

Eine Energieversorgung von elektronischen Geräten über Kupfer- oder Koaxialkabel ist in bestimmten Umgebungen problematisch. Dazu zählen Anwendungen, in denen eine hohe elektrische oder magnetische Isolation erforderlich ist, um Funkenbildung, Kurzschlüsse oder elektromagnetische Störungen zu vermeiden. Auch rotierende Systeme oder schwer zugängliche Orte sind schwierig. In solchen Situationen stellt die optische Leistungsübertragung eine Alternative dar. Dazu sind drei wesentliche Komponenten erforderlich (Abb. 3): Eine monochromatische Strahlquelle (Laser oder LED), ein Übertragungsmedium (Luft oder Lichtleiter) und ein Energiekonverter (photovoltaische Zelle).

Henning Helmers, Eduard Oliva, **Simon Philipps**, Kasimir Reichmuth, Dirk Reinwand, Gerald Siefer, Andreas Bett

Photovoltaische Zellen aus III-V Halbleitern können monochromatisches Licht sehr effizient in elektrische Energie umwandeln. Der Schlüssel für hohe Wirkungsgrade ist eine Abstimmung der Wellenlänge des eingestrahlt Lichts und der Bandlücke der photovoltaischen Zelle. Mit GaAs-basierten



3 Schematischer Aufbau eines Systems zur optischen Energieübertragung. Als optische Energiequelle dient ein Laser, dessen monochromatisches Licht über einen Lichtleiter auf eine photovoltaische Zelle gelenkt wird. Diese wandelt die optische Energie mit hohem Wirkungsgrad in elektrische Energie um.

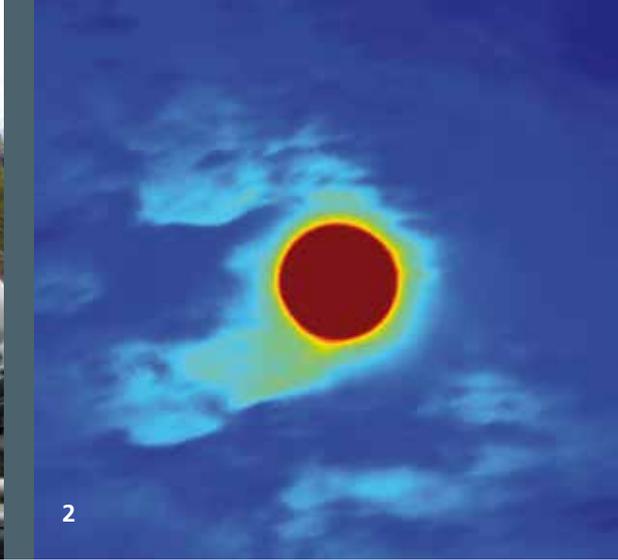
1 Photovoltaische Zelle aus GaAs zur Umwandlung von monochromatischem Licht im Bereich von 810 nm. Für die Integration in Systeme der optischen Energieübertragung ist die Zelle auf einem Standard TO-Header montiert. Die Zelle besteht aus zwei integriert seriell verschalteten Segmenten, um eine höhere Ausgangsspannung zu erzielen.

2 Drahtbonder zur Verschaltung der Photovoltaik-Zelle auf dem Standardsockel. Unsere Fertigungslinie ermöglicht die Montage mit hohem Durchsatz und reproduzierbarer Qualität.

Laserleistungszellen haben wir bereits Wirkungsgrade von bis zu 54,9% erreicht, gemessen mit einer Laserwellenlänge von 810 nm.

Die vielfältigen Anwendungsgebiete der optischen Energieübertragung führen zu unterschiedlichen Anforderungen an die photovoltaischen Zellen. Im aktuellen Projekt »Optowind« wird beispielsweise ein blitzsicheres Sensorkonzept zur technischen Zustandsüberwachung und -bewertung von Windkraftanlagen entwickelt. Die Spannung einer herkömmlichen photovoltaischen Zelle ist für die Versorgung der elektronischen Komponenten nicht ausreichend. Wir entwickeln daher Photovoltaikzellen mit höherer Ausgangsspannung. Dies gelingt durch eine integrierte, serielle Verschaltung mehrerer Zellen in nur einem Bauteil mittels vertikaler Stapelung oder lateraler Verschaltung (Abb. 1). Um die Dämpfung in der optischen Faser zu reduzieren, ist zudem die Verwendung von Lasern mit höheren Wellenlängen interessant. Für das Projekt werden photovoltaische Zellen aus GaInAs entwickelt, die Licht von leistungsstarken Lasern mit einer höheren Wellenlänge von 980 nm effizient umwandeln können.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.



SYSTEM ZUR HOCHAUFGELÖSTEN VERMESSUNG DER ZIRKUMSOLARSTRAHLUNG

Die Zirkumsolarstrahlung ist der Teil der einfallenden Sonnenstrahlung, der in der Atmosphäre gestreut wird und dadurch aus einem Raumwinkelbereich um die Sonnenscheibe herum den Erdboden erreicht. Dieser Anteil kann an Standorten in Wüsten oder nahe Küsten signifikant hoch sein und seine genaue Winkelverteilung hat einen großen Einfluss auf den Wirkungsgrad hochkonzentrierender Photovoltaikanlagen. Wir haben ein neues kamerabasiertes Messsystem entwickelt, das die Winkelverteilung der Zirkumsolarstrahlung im relevanten Bereich, ihren Gesamtbeitrag sowie deren Änderung über den Tag hochaufgelöst erfasst. Die Ergebnisse der Messungen ermöglichen uns ein besseres Verständnis des Einflusses der Zirkumsolarstrahlung auf den Leistungsertrag von konzentrierenden Photovoltaiksystemen.

Thorsten Hornung, Peter Nitz, **Thomas Schmidt**, Simeon Schrott, Maik Wiesenfarth, Andreas Bett

Das Messsystem (Abb. 1) besteht aus einer Kamera und einem speziell für diese Anwendung entwickelten Objektiv. Letzteres haben wir in Strahlverfolgerechnungen am Computer und in Laborexperimenten mit einer künstlichen Sonne aufwendig optimiert, um das Streulicht zu reduzieren. Mit dem hochauflösenden Kamerasystem führen wir automatisiert bis zu 360 Messungen und Datenauswertungen pro Stunde durch. Dabei erfassen wir die Verteilung der direkten Solarstrahlung im Winkelbereich bis 55 mrad Halbwinkel und mit einer Auflösung von 0,1 mrad zweidimensional. Aus diesen gemessenen Daten berechnen wir unter anderem den Zirkumsolaranteil (CSR) des Sonnenlichts.

1 Das Kamerasystem zur zeit- und winkelaufgelösten Vermessung der Zirkumsolarstrahlung (weißes Gehäuse) montiert auf einem Trägersystem, das der Sonne nachgeführt wird.

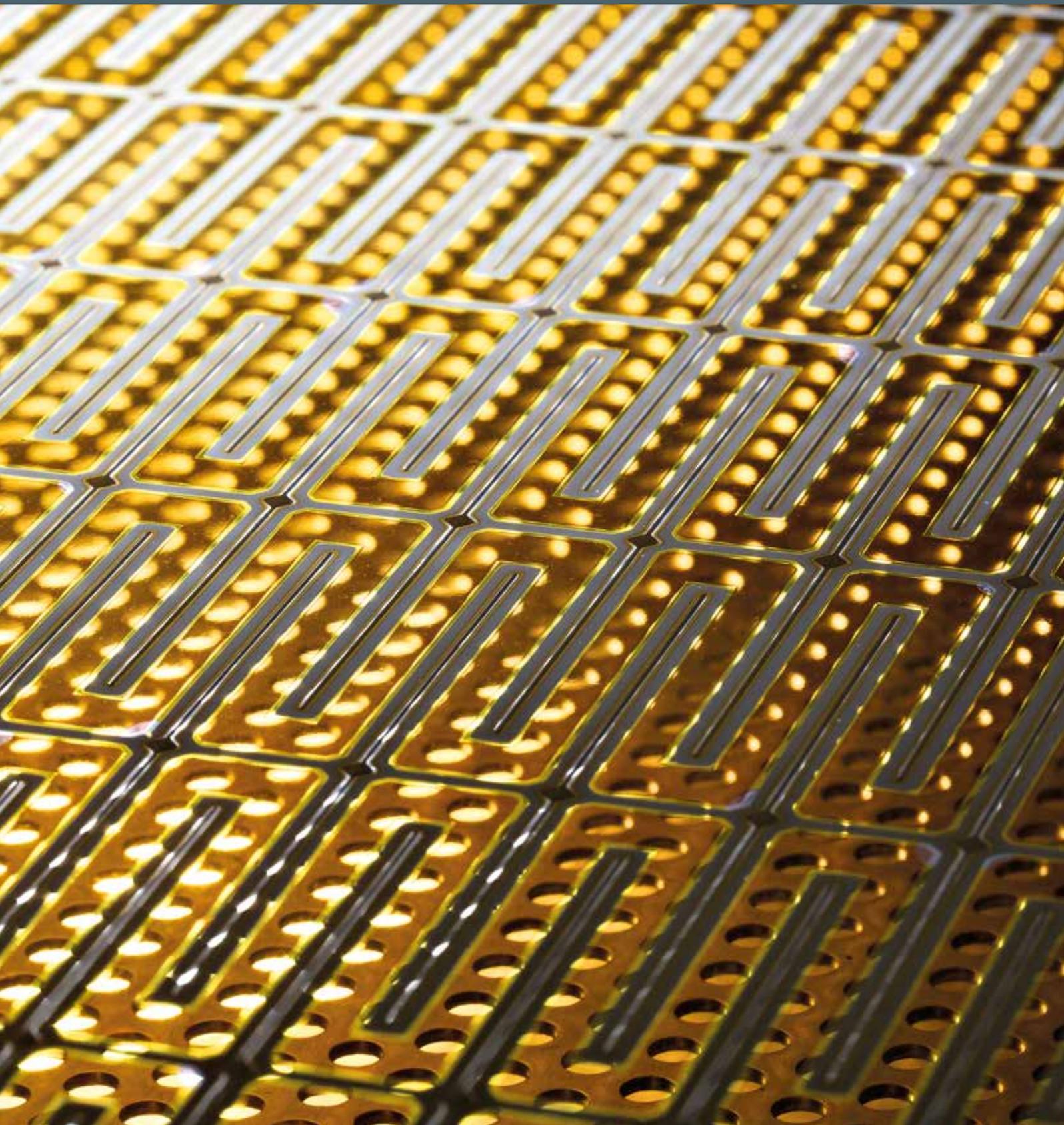
2 Falschfarbendarstellung eines mit dem Messsystem aufgezeichnetem HDR-Bildes (High Dynamic Range Image) der Direktsolar- und Zirkumsolarstrahlung. Die Bestrahlungsstärke nimmt von dunkelrot über gelb nach dunkelblau um fünf Größenordnungen ab. Auch leichte Trübungen der Atmosphäre werden sichtbar.

Die Bestrahlungsstärken inner- und außerhalb der Sonnenscheibe unterscheiden sich um bis zu fünf Größenordnungen. Dieser Unterschied übersteigt den Dynamikumfang der verwendeten Kamera bei weitem. Um dennoch präzise Messungen zu ermöglichen, adaptierten wir das HDR-Messprinzip (High Dynamic Range) aus der Fotografie. Für die Messung kombinieren wir vier verschieden lang belichtete Messbilder und berechnen daraus ein Bild. Dieses Verfahren stellt sowohl den Bereich der Sonnenscheibe als auch den wesentlich dunkleren Bereich um die Sonne korrekt dar (Abb. 2).

Mit diesem System können wir auch erstmals spektral hochaufgelöste Verteilungsfunktionen der Zirkumsolarstrahlung vermessen. Mittels dieser Datenerhebung erarbeiten wir ein wesentlich besseres Verständnis des Einflusses der Zirkumsolarstrahlung auf den Energieertrag von konzentrierenden Photovoltaiksystemen.

Das Projekt wird durch unseren Industriepartner Soitec Solar und das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.

FARBSTOFF-, ORGANISCHE UND NEUARTIGE SOLARZELLEN



Das Geschäftsfeld Farbstoff-, Organische und Neuartige Solarzellen gliedert sich in die Themenschwerpunkte:

- Farbstoffsolarzellen
- Organische Solarzellen
- Photonenmanagement
- Tandemsolarzellen auf kristallinem Silicium

Gemeinsames Ziel ist, mit neuen Technologien die Kosten für die solare Energiegewinnung zu senken. Im Wesentlichen werden hierzu zwei Hebel angesetzt: die Verwendung kostengünstigerer Materialien und Herstellungsprozesse – insbesondere bei den Farbstoff- und Organischen Solarzellen – sowie die Steigerung der Effizienz durch verbessertes Photonenmanagement oder neue Materialien, die teilweise auch mit verschiedenen PV-Technologien kombiniert werden können.

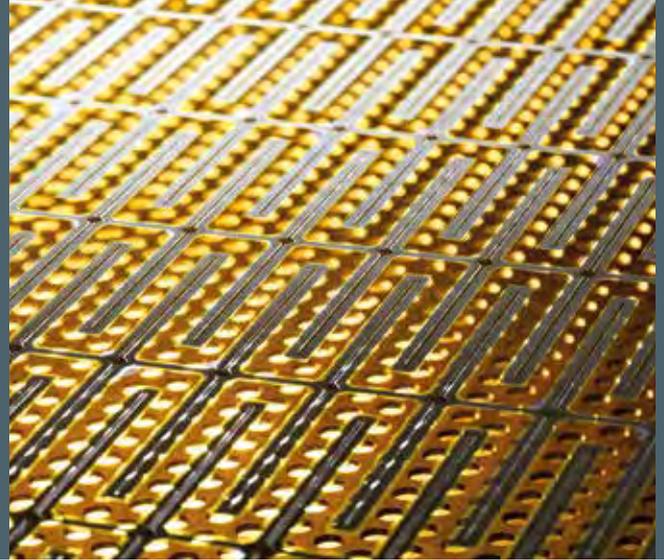
Am Fraunhofer ISE wird an der Entwicklung von großflächigen Farbstoffsolarmodulen für die Anwendung in photovoltaisch aktivem Architekturglas gearbeitet und die Übertragung der Herstellungskonzepte auf das aktuelle Thema der Perowskit-Solarzellen erforscht. Wir konnten zeigen, dass mit Siebdruck- und neuen Versiegelungstechniken Module in industrienahen Techniken gefertigt werden können. Die 60 cm x 100 cm großen Module mit langzeitstabiler Glaslotversiegelung und interner serieller Verschaltung können in Zusammenarbeit mit Partnern aus der Industrie reproduzierbar hergestellt werden. Es wird hierfür speziell eine in-situ Beschichtungsmethode für Perowskit-Solarzellen optimiert, die sich bei sehr geringem Materialbedarf einfach aufskalieren lässt.

Im Themenschwerpunkt Organische Solarzellen beschäftigen wir uns mit der ganzen Bandbreite der physikalischen und technologischen Fragestellungen der organischen Photovoltaik. Dies reicht vom grundlegenden Verständnis der Funktionsweise organischer Solarzellen bis zur Entwicklung produktionsrelevanter Zell- und Modulkonzepte. Wir testen und charakterisieren neuartige organische Halbleiter und analysieren das Effizienzpotenzial auf Basis von eingehender experimenteller Charakterisierung in Kombination mit optischer und elektrischer Modellierung. Elektrische Modelle erlauben uns darüber hinaus die anwendungsspezifische Auslegung und Optimierung verschiedener Modulstrukturen. Im Labor werden neuartige Zell- und Modulkonzepte mit hohem Potenzial zur Kostensenkung entwickelt und im Rolle-zu-Rolle-Verfahren umgesetzt.

Im Bereich Neuartige Solarzellenkonzepte und Photonenmanagement entwickeln wir Konzepte, Materialien und Technologien, um die Grenzen des Wirkungsgrads herkömmlicher Photovoltaik-Technologien zu überwinden und so die spezifischen Kosten entlang der gesamten Wertschöpfungskette zu senken. Unsere Aktivitäten umfassen dabei Konzepte des Photonenmanagements, wie Light-Trapping-Strukturen, Hochkonversion, Winkelselektivität, spektrale Aufteilung und fortschrittliche Lichtfallenkonzepte. Die untersuchten Konzepte sind dabei meist nicht auf eine bestimmte Solarzellentechnologie begrenzt, sondern können sowohl in bereits etablierten als auch in noch in der Entwicklung stehenden Technologien eingesetzt werden.

Für die bessere Ausnutzung des Sonnenspektrums (Reduzierung der Thermalisierungsverluste) entwickeln wir auch Silicium-basierte Tandemsolarzellen. Dabei stehen neben der Prozessanpassung der Si-Basiszelle und der Entwicklung von Tunnelkontakten vor allem neue Silicium-Nanokristallmaterialien mit einstellbaren Bandkanten sowie III-V-basierte Absorbermaterialien im Mittelpunkt unserer Forschungsarbeit. Die Zusammenführung der beiden Einzelzellen erreichen wir sowohl durch direktes Aufwachsen auf der Si-Basiszelle als auch durch Bonden.





Detailausschnitt der Herstellung eines glaslotversiegelten Farbstoffsolarmoduls.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Uli Würfel

Telefon +49 761 203-4796
uli.wuerfel@ise.fraunhofer.de

Farbstoffsolarzellen

Dr. Andreas Hinsch

Telefon +49 761 4588-5417
novelpv.dye@ise.fraunhofer.de

Organische Solarzellen

Dr. Uli Würfel

Telefon +49 761 203-4796
novelpv.organic@ise.fraunhofer.de

Photonenmanagement

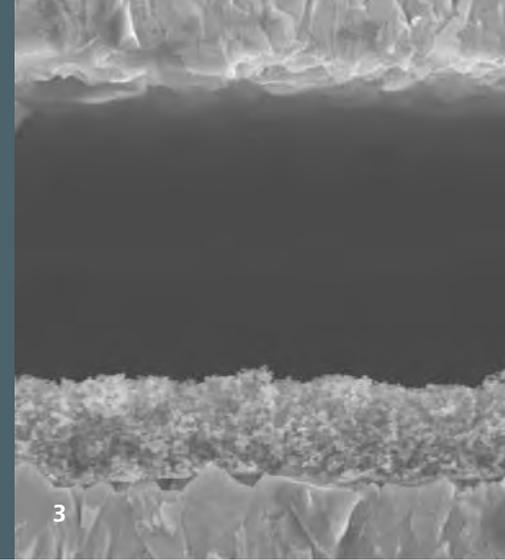
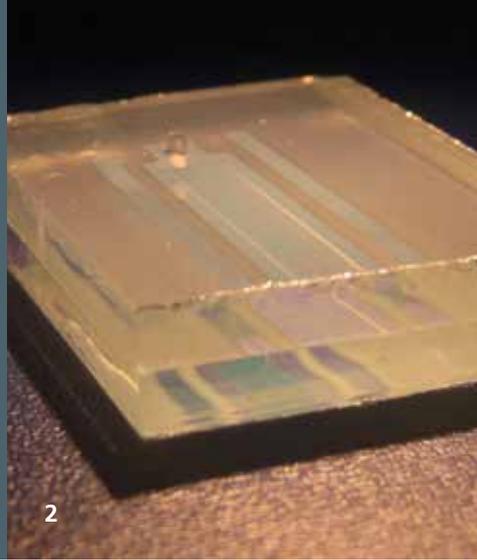
Dr. Jan Christoph Goldschmidt

Telefon +49 761 4588-5475
novelpv.photonics@ise.fraunhofer.de

**Tandemsolarzellen auf
kristallinem Silicium**

Dr. Stefan Janz

Telefon +49 761 4588-5261
novelpv.silicon@ise.fraunhofer.de



KONZEPTE FÜR IN-SITU HERSTELLUNG VON PEROWSKIT-SOLARZELLEN

In den letzten Jahren wurden am Fraunhofer ISE erfolgreich großflächige Farbstoffsolarmodule auf Glassubstraten entwickelt und ein entsprechendes in-situ Herstellungsverfahren etabliert. Hierbei werden die Solarzellen aus Lösungen innerhalb eines durch niedrigschmelzende Glaslote hermetisch versiegelten Moduls erzeugt; Vakuumprozesse und eine Laminierung der Module entfallen. Wie unsere konzeptionellen Arbeiten 2013 zeigen, lässt sich diese kostengünstige Technologie sehr gut auf das top-aktuelle Forschungsgebiet der Perowskit-Solarzellen übertragen.

Henning Brandt, Katrine Flarup-Jensen, **Andreas Hirsch**, Simone Mastroianni, Welmoed Veurman, Stefan Glunz

Perowskit-Solarzellen befinden sich derzeit noch im Forschungsstadium an Universitäten. Nachdem 2013 jedoch bereits ein zertifizierter Laborwirkungsgrad von 14,1% für aus der Lösung aufgebraute Perowskit-Solarzellen erzielt werden konnte, erfährt dieses Konzept ein starkes weltweites Forschungsinteresse. Eine weitere Steigerung des Wirkungsgrads ist mit zunehmendem Verständnis der zugrundeliegenden photovoltaischen Prinzipien zu erwarten. Parallel zur Grundlagenforschung ist es nun notwendig, geeignete Konzepte für die Aufskalierung der Zellen in einem kostengünstigen Verfahren zu entwickeln.

Ausgehend von dem für Farbstoffsolarzellen entwickelten Glaslotverfahren zur Versiegelung wird am Fraunhofer ISE untersucht, wie sich das Prinzip der Perowskit-Solarzelle durch eine in-situ Beschichtungsmethode optimieren und aufskalieren lässt. Sehr dünne ($< 1 \mu\text{m}$), poröse Trägerschichten werden

- 1 *In-situ Herstellung von lösungsmittelbasierten Solarzellen; für Farbstoffsolarmodule bereits realisiert.*
- 2 *Querschnitt eines glaslotversiegelten Zellaufbaus für Perowskit-Solarzellen.*
- 3 *REM-Aufnahme des Zellaufbaus im Querschnitt vor der Befüllung.*

im Siebdruckverfahren auf zwei mit TCO ($\text{SnO}_2:\text{F}$) versehene Glassubstrate aufgebracht und mit Glaslot in sehr geringem Abstand thermisch versiegelt. Es wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem die porösen Trägerschichten nacheinander mit den gelösten aktiven Materialien der Perowskit-Solarzelle gefüllt werden. Durch Variation der Porositäten und der Partikelgrößen in den Trägerschichten werden die aktiven Materialien in einem selbst-organisierten Prozess durch Kapillarkräfte abgeschieden und bilden nach Trocknung die Solarzelle. Im Glassubstrat speziell angeordnete Strukturen ermöglichen den Transport und die inerte Trocknung der Lösungsmittel. Das Verfahren ermöglicht eine sehr ressourcenschonende Herstellung von zukünftigen Perowskit-Solarmodulen.

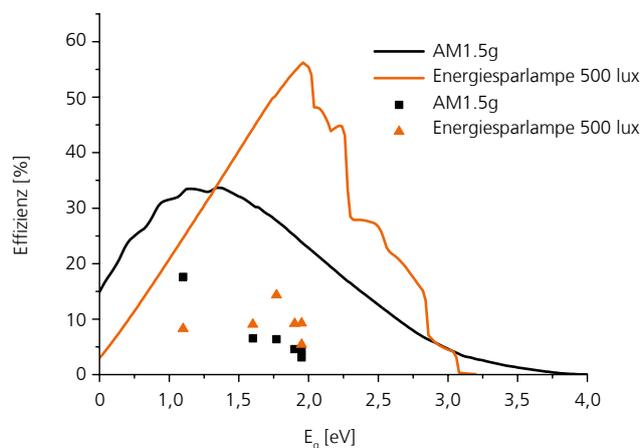
Die Arbeiten fanden im Rahmen des von der Europäischen Kommission geförderten Forschungsprojekts »GLOBAL SOLAR« statt.



FERTIGUNGS- UND ANWENDUNGSPOTENZIALE ORGANISCHER SOLARZELLEN

Organische Solarzellen haben mittelfristig großes Potenzial, kostengünstig erneuerbare Energie bereit zu stellen. Notwendige Entwicklungen hierfür sind die weitere Steigerung des Wirkungsgrads von derzeit etwa 10%, die Verbesserung der Langzeitstabilität im Außenbereich sowie die schnelle und kosteneffiziente Fertigung in Rolle-zu-Rolle-Verfahren. Unsere Arbeitsschwerpunkte liegen daher besonders bei Rolle-zu-Rolle-kompatiblen Zell- und Modulkonzepten sowie der Steigerung der Zell- und Moduleffizienz und der Verbesserung der Langzeitstabilität. Ein weiterer Fokus liegt auf der anwendungsspezifischen Auslegung und Optimierung von Zell- und Modulkonzepten.

Deepak Kaduwal, Hans-Frieder Schleiermacher, Jan Schulz-Gericke, Clemens Veit, **Birger Zimmermann**, Uli Würfel, Stefan Glunz



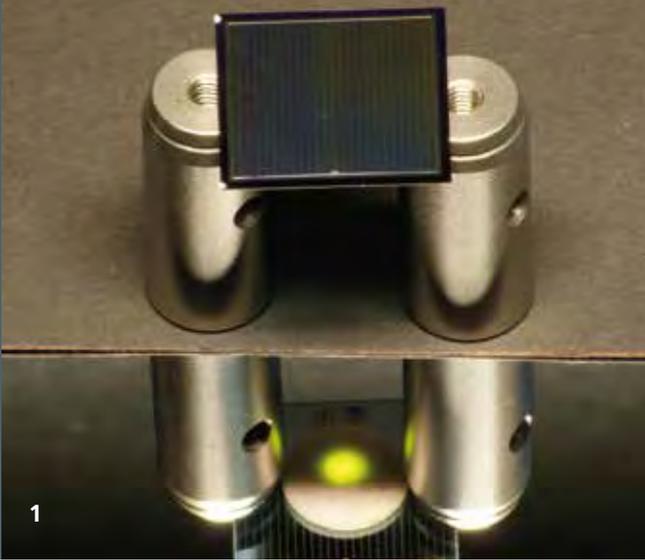
2 Theoretische (Linien) und gemessene (Symbole) Effizienzen verschiedener Solarzellen bei Beleuchtung mit Sonnenlicht (Schwarz) und einer Energiesparlampe (Rot) in Abhängigkeit von der Bandlücke des Halbleiters.

1 Der organische Halbleiter wird mittels Schlitzdüsen gießen auf einer metallisierten PET-Folie aufgebracht. Mit der Laboranlage am Fraunhofer ISE lassen sich Produktionsgeschwindigkeiten von mehreren Metern pro Minute erreichen.

Organische Solarzellen mit Rekorderffizienzen von mehr als 10% werden im Labor unter Inertgas und mittels Aufschleudern aus halogenierten Lösungsmitteln prozessiert. Dabei gehen über 90% des Materials verloren. Die quantitative und homogene Beschichtung der nur etwa 100–200 Nanometer dünnen Halbleiterschichten ist für die Produktionstechnologie eine große Herausforderung. Um Kosten zu sparen und die Energiebilanz zu verbessern, ist die Prozessierung an Umgebungsluft sehr vorteilhaft. Gesundheitsschädliche Lösungsmittel sollten zudem aus Arbeitsschutzgründen vermieden werden. Wir haben ein Zellkonzept entwickelt, das eine Prozessierung an Luft aus nicht halogenierten Lösungsmitteln erlaubt und außerdem sehr kostengünstige Materialien und Herstellungsprozesse verwendet. Damit konnten wir Solarzellen mit im Rolle-zu-Rolle-Verfahren beschichteten organischen Halbleitern (Abb. 1) herstellen, die die gleiche Effizienz erreichen wie im Laborprozess.

In ihrem derzeitigen Entwicklungsstand können organische Solarzellen noch nicht in Konkurrenz zu etablierten Photovoltaiktechnologien treten. Erste Anwendungen im Innenraum sind jedoch bereits denkbar, da organische Solarzellen dort sowohl eine hohe Effizienz als auch eine vielversprechende Langzeitstabilität erreichen. So könnten beispielsweise Sensoren oder Anzeigeelemente mit Strom versorgt werden, ohne Kabel verlegen zu müssen oder Batterien auszutauschen. Unter typischer Bürobeleuchtung konnten wir eine Effizienz von mehr als 14% erreichen (Abb. 2).

Die Arbeiten wurden von der Europäischen Union (EU) und der Baden-Württemberg Stiftung unterstützt.



MEHR STROM – DURCH HOCHKONVERSION MEHR SONNENLICHT NUTZEN

Siliciumsolarzellen können ungefähr 20% der im Sonnenlicht enthaltenen Energie nicht nutzen, weil Photonen mit Energien unterhalb der Bandlücke nicht im Silicium absorbiert werden. Hochkonversion macht auch diese Photonen mit niedrigerer Energie nutzbar. Dazu werden zwei Photonen mit wenig Energie zu einem Photon mit mehr Energie kombiniert. Durch Verbesserung der eingesetzten Solarzellen und Materialien konnte am Fraunhofer ISE jetzt erstmals eine signifikante Stromerhöhung durch Hochkonversion in Konzentratormodulen mit Siliciumsolarzellen und Hochkonvertern gemessen werden.

Johannes Eisenlohr, Stefan Fischer, Judith Frank, Benjamin Fröhlich, **Jan Christoph Goldschmidt**, Johannes Gutmann, Martin Hermle, Barbara Herter, Marc Rüdiger, Maike Wiesenfarth, Sebastian Wolf, Stefan Glunz

In einem optimalen System aus Solarzelle und einem dahinter liegenden Hochkonverter muss nicht nur – wie in einer einfachen Solarzelle – viel Licht im Silicium absorbiert werden, sondern es müssen auch möglichst viele niederenergetische Photonen durch die Solarzelle hindurch zum Hochkonverter gelangen. Dazu wurden am Fraunhofer ISE spezielle bifaciale Siliciumsolarzellen mit einem hohen Wirkungsgrad entwickelt, die ideal dafür geeignet sind, durch Hochkonversion den Wirkungsgrad weiter zu steigern. Sie verfügen neben einer doppellagigen Antireflexbeschichtung auf der Vorderseite über eine Antireflexbeschichtung auf der Rückseite. Diese sorgt auch für eine gute Einkopplung des vom Hochkonverter emittierten Lichts.

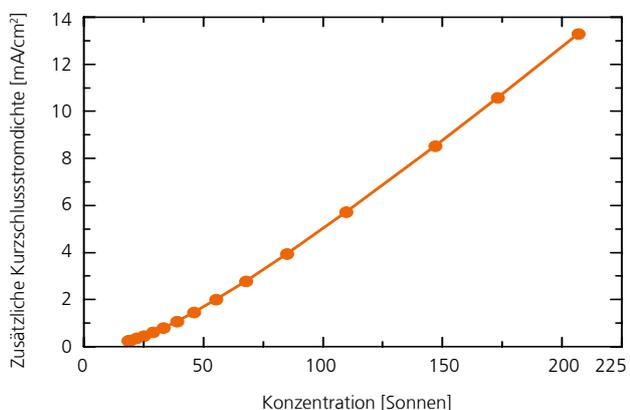
Der Hochkonverter auf der Rückseite der Solarzellen (Abb. 1) besteht aus Erbium dotiertem Natriumyttriumtetrafluorid, das an der Universität Bern synthetisiert wurde. Dieses mikro-

1 Ein nicht sichtbarer infraroter Laser trifft von oben auf eine bifaciale Siliciumsolarzelle und geht durch diese hindurch. Durch Hochkonversion auf der Rückseite der Solarzelle entstehen sichtbare Photonen, die von der Solarzelle genutzt werden können.

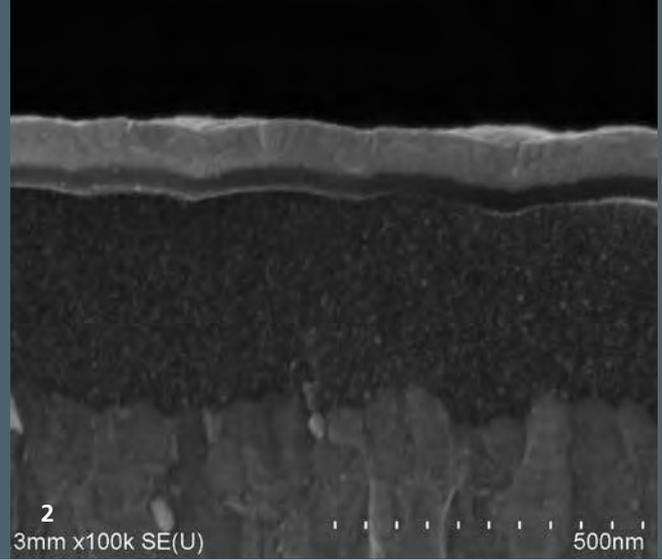
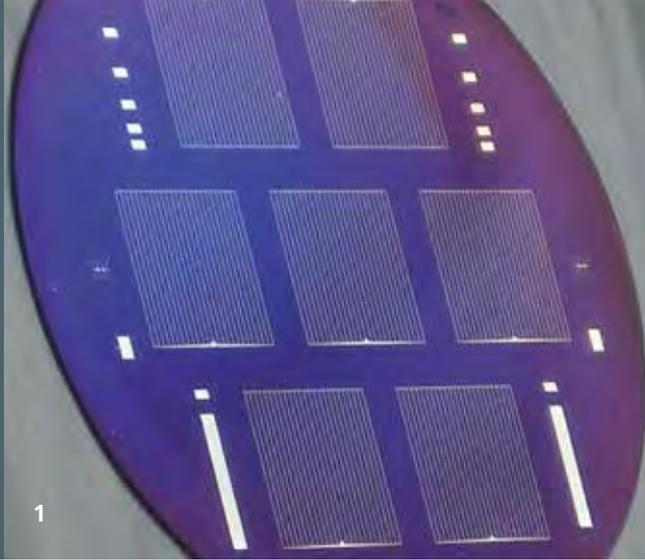
2 Messaufbau eines Konzentratormoduls mit Siliciumsolarzelle und Hochkonverter.

kristalline Pulver wurde anschließend von der Heriot-Watt University in Edinburgh in einen Polymer eingebettet. Das System aus Hochkonverter und Solarzelle wurde in ein Konzentratormodul integriert (Abb. 2). Der Gewinn durch die Hochkonversion steigt mit der Konzentration des Sonnenlichts an (Abb. 3). Obwohl dank der Optimierung die bisher besten Ergebnisse für die Hochkonversion gemessen wurden, ist der relative Nutzen für die Solarzelle noch gering. Um dies zu ändern, werden unterschiedliche photonische Konzepte untersucht, mit denen sich die Effizienz der Hochkonversion weiter steigern lässt.

Das Projekt wurde vom Siebten Rahmenprogramm der Europäischen Union (EU) unterstützt.



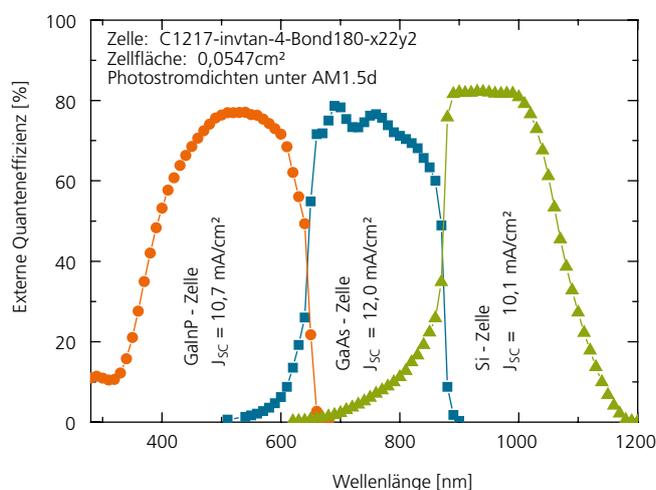
3 Stromgewinn durch Hochkonversion in Abhängigkeit von der Konzentration des Sonnenlichts.



HÖCHSTEFFIZIENTE MEHRFACHSOLARZELLEN AUF KRISTALLINEM SILICIUM

Das Fraunhofer ISE entwickelt für Solarzellen auf der Basis von kristallinem Silicium verschiedene Konzepte, die Wirkungsgrade jenseits der 25% bei einer Sonne zum Ziel haben. Einer unserer Entwicklungsschwerpunkte sind Tandemsolarzellen, bei denen Absorber mit höheren Bandlückenenergien über der kristallinen Si-Basiszelle angeordnet werden. Durch diese Kombination von Solarzellen mit unterschiedlichem Absorptionsverhalten können wir das Sonnenspektrum durch eine Verringerung der Thermalisierungsverluste wesentlich effizienter nutzen. Als Absorbermaterialien untersuchen wir im Wesentlichen zwei Materialgruppen – III-V Halbleiter und Si-Nanokristalle.

Jan Benick, Frank Dimroth, Stephanie Essig, Jasmin Fuchs, Martin Hermle, **Stefan Janz**, Eduard Oliva, Dirk Reinwand, Andreas Bett, Stefan Glunz



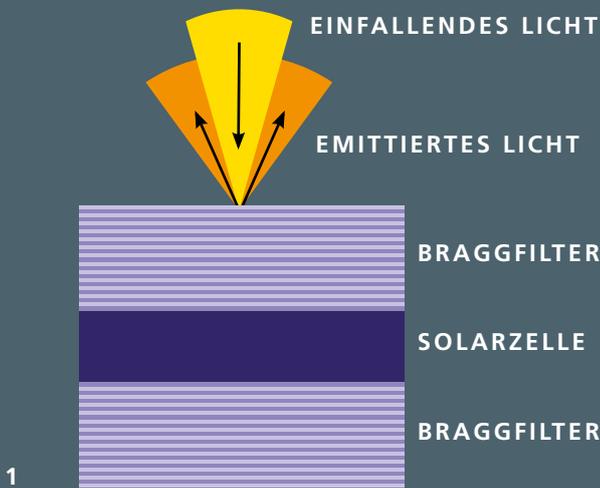
3 Externe Quanteneffizienz der GaInP/GaAs/Si-Dreifachsolarzelle. Die gezeigten Photostromdichten wurden für jede Teilzelle unter dem terrestrischen Sonnenspektrum AM1.5d berechnet.

1 Erste Tandemsolarzellen auf der Basis einer Si-Wafer-Bottom- und einer Si-Nanokristall-Top-Solarzelle.

2 Querschnittsbild der Tandemsolarzelle mit dem Tunnelkontakt, dem Si-Nanokristallabsorber und den Vorderseiten-Kontaktschichten.

Solarzellen aus III-V Verbindungshalbleitern erreichen heute die höchsten Wirkungsgrade und werden im Weltraum und in terrestrischen Konzentratorsystemen eingesetzt. Insbesondere aufgrund der teuren Substrate (GaAs, Ge) sind die Kosten solcher Zellen für Flachmodule jedoch zu hoch. Am Fraunhofer ISE arbeiten wir daran, III-V Mehrfachsolarzellen mit kostengünstigen Si-Substraten zu verbinden. Silicium ist auch aufgrund seines Absorptionsverhaltens sehr gut für die unterste Teilzelle geeignet. Mittels »Wafer-Bonding« verbinden wir Silicium mit weiteren Teilzellen aus Gallium-Arsenid (GaAs) und Gallium-Indium-Phosphid (GaInP). Dadurch wird über einen breiten Wellenlängenbereich von 450 bis 1035 nm eine externe Quanteneffizienz von über 70% erzielt (Abb. 3). Unsere Dreifachsolarzellen erreichen Wirkungsgrade von bis zu 24,4% bei einer Sonne und 27,9% unter konzentriertem Licht. Durch eine verbesserte Stromanpassung der Teilzellen wollen wir die Wirkungsgrade auf über 30% steigern.

In Kooperation mit europäischen Forschungspartnern wurde am Fraunhofer ISE die erste ausschließlich c-Si-basierte Tandemsolarzelle hergestellt. Kernpunkte unserer Entwicklung waren dabei die Anpassung der Si-Waferzelle für die nachfolgenden hohen thermischen Lasten (Festphasenkristallisation der Si-Nanokristalle) und die Realisierung eines temperaturstabilen ohmschen Kontaktes aus kristallinem Siliciumkarbid zur monolithischen Verschaltung der beiden Einzelzellen. Das Erreichen einer Leerlaufspannung von 978 mV zeigt eindeutig die Funktionalität des Solarzellenbauteils und seiner Einzelkomponenten.



PHOTONISCHE KONZEPTE FÜR SOLARZELLEN IM STRAHLENDEN LIMIT

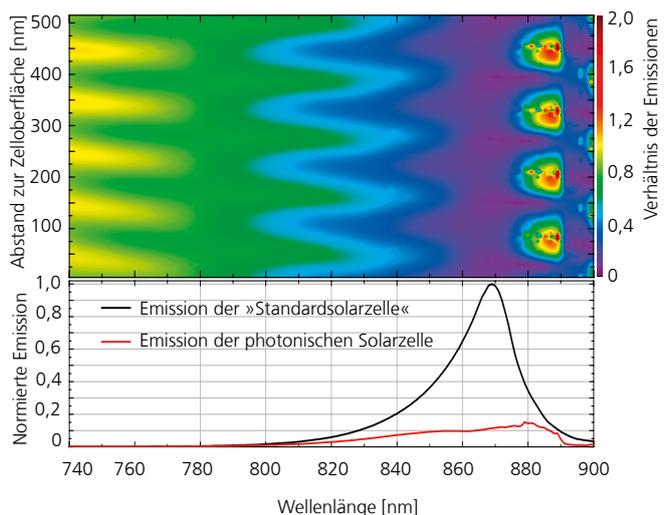
Da der Lichteinfall auf eine Solarzelle nur aus einem schmalen Winkelbereich stattfindet, die Zelle aber in den kompletten Halbraum abstrahlen kann, entstehen thermodynamische Verluste. Um diese zu verringern, entwickeln wir winkelselektive Filter, die die Abstrahlung einschränken und so die Systemeffizienz verbessern können. Eine Herausforderung ist dabei das Design und die Optimierung geeigneter photonischer Dünnschichtfilter. Wir haben dazu Programme entwickelt, die diese Optimierung ermöglichen und die durch Kopplung optischer und elektrischer Eigenschaften eine Abschätzung der Effizienz solcher Systeme erlauben. Für den experimentellen Nachweis arbeiten wir an der Realisierung eines solchen Systems.

Benedikt Bläsi, Oliver Höhn, Tobias Kraus, Werner Platzer

Photonische Dünnschichtfilter können winkelselektive Eigenschaften aufweisen. Ein Beispiel sind Braggfilter, die aus alternierenden Schichten zweier Materialien mit unterschiedlichem Brechungsindex bestehen. Diese Filter weisen bei bestimmten Wellenlängen winkelabhängige Reflexionspeaks auf, die den Anforderungen in einem Solarzellensystem sehr gut entsprechen. Durch geschicktes Modifizieren einzelner Schichtdicken und Hinzufügen weiterer Schichten passen wir diesen Bereich an und optimieren die Transmission des Filters in dem Bereich, in dem Licht auf die Zelle fällt. Hierfür verwenden wir einen genetischen Algorithmus. Die Effekte solcher Filter können in PC1D-Simulationen berücksichtigt und so der potenzielle Gewinn abgeschätzt werden.

Ein noch weitergehender Ansatz ist die Einführung einer photonischen Solarzelle, bei der Zelle und Filter in einem optoelektronischen Bauelement vereint sind. Möglich ist z. B. der Einbau einer dünnen GaAs-Solarzelle als Defektschicht in einen 1D-Photonischen Kristall (Abb. 1). Hierbei wird, anders

1 Schema einer photonischen Solarzelle als Defektschicht in einem 1D-photonischen Kristall. Der Emissionswinkel der Zelle kann im Vergleich zu einer »Standardsolarzelle« verringert werden.

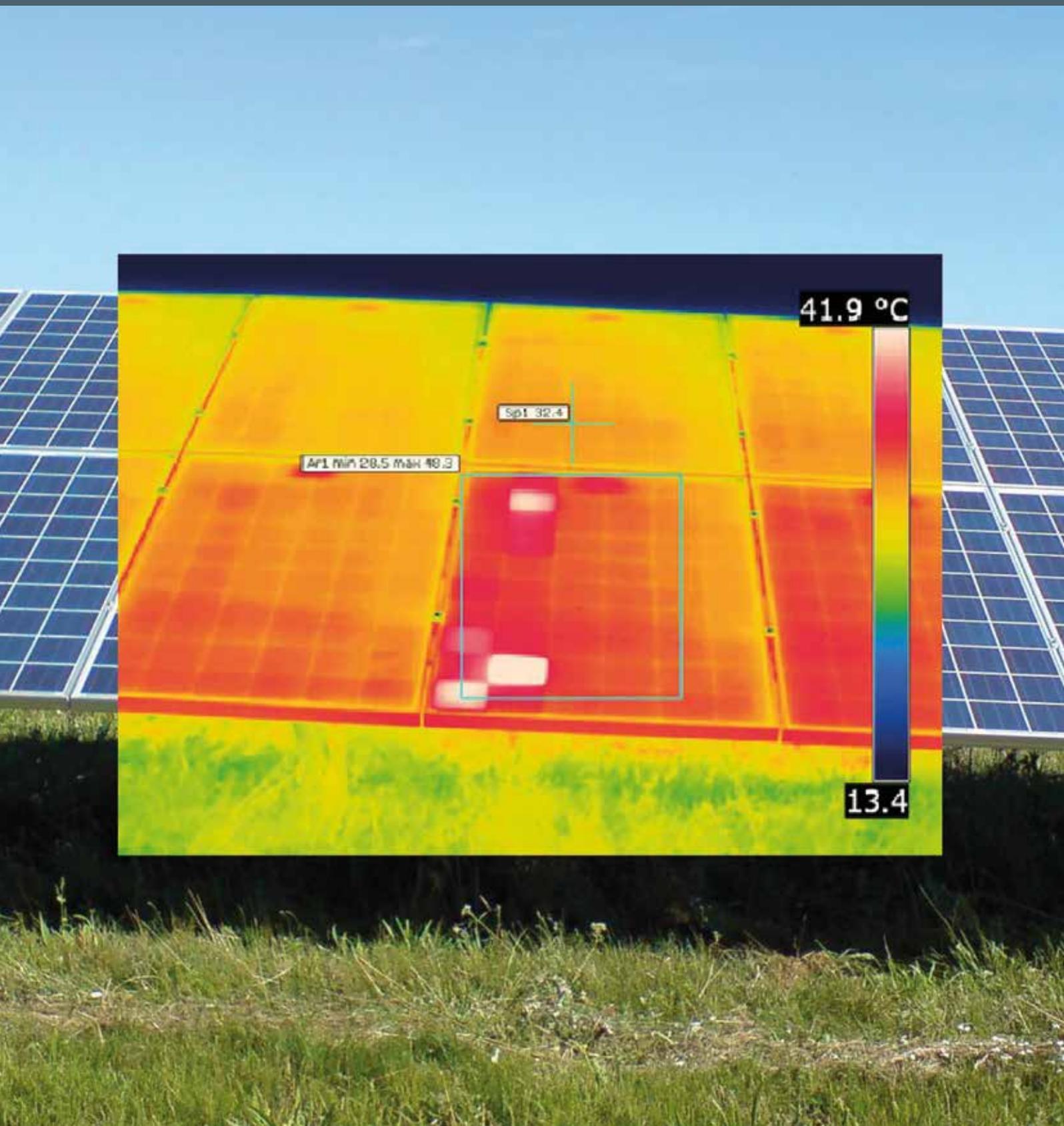


2 Oben: Verhältnis der tiefenabhängigen Emissionen aus der photonischen Solarzelle und der »Standardsolarzelle«. Unten: Gesamtemission aus einer photonischen Solarzelle im Vergleich zur »Standardsolarzelle«. Die verringerte Emission ist erkennbar.

als oben, emittierte Strahlung nicht zurück reflektiert, sondern die Emission selbst unterdrückt (Abb. 2). Für die Simulation verwenden wir dabei einen Streumatrixformalismus. Wir koppeln diese Simulationen zudem mit elektrischen Simulationen (PC1D). Erste Ergebnisse zeigen die gewünschte Unterdrückung, so dass wir an der Realisierung eines solchen Systems arbeiten.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen des Verbundprojekts »INFRAVOLT« und vom Stipendiatenprogramm der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unterstützt.

PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND KRAFTWERKE



Modultechnologie verwandelt Solarzellen in ein beständiges Produkt für den sicheren Betrieb in PV-Kraftwerken. Wir unterstützen die Modulentwicklung in Richtung optimaler Wirkungsgrade, reduzierter Kosten, höchster Zuverlässigkeit und spezialisierter Anwendungen wie die Gebäudeintegration. Wir charakterisieren Module auf höchstem Präzisionsniveau, analysieren ihre Gebrauchsdauer und bieten umfassende Modulprüfungen an. Die Qualität von PV-Kraftwerken sichern wir durch präzise Ertragsgutachten, durch umfangreiche Anlagenprüfungen und genaue Ermittlung der tatsächlichen Performance Ratio im laufenden Betrieb.

Das Photovoltaik Modul-Technologiecenter (MTC) bietet eine große Bandbreite an Prozess- und Analyseplattformen für die Materialerprobung sowie für die Produkt- und Prozessentwicklung in allen Fertigungsstufen. Mit Simulationen analysieren wir elektrische, optische und mechanische Effekte im Modul. Unsere Wissenschaftler führen Entwicklungen aus dem Laborstadium auf direktem Weg zu aussagekräftigen Modulstückzahlen und -formaten.

Entscheidend für die Rentabilität eines PV-Kraftwerks sind neben der Systemeffizienz die Lebensdauer und das Degradationsverhalten seiner Komponenten. Das Verständnis und die Definition der Alterungsursachen ist Aufgabe der Umweltsimulation, bei der das Verhalten von Prüflingen, z. B. PV-Modulen, an ausgewählten Standorten genauestens beobachtet wird. Mit unserer Analytik untersuchen wir den Einfluss der klimatischen Belastung, um Alterungsmechanismen möglichst frühzeitig und zerstörungsfrei zu erkennen, z. B. durch Raman- und FTIR-Spektroskopie.

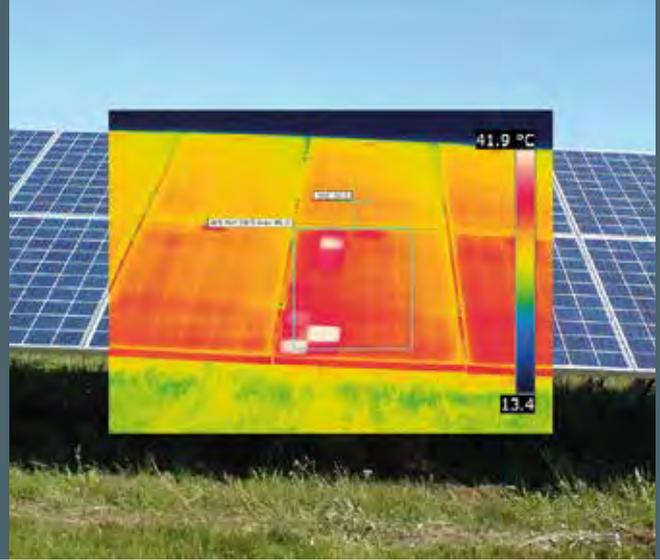
Auf Basis der Umwelt- und Degradationsanalyse entwickeln wir Simulationsmodelle und beschleunigte Prüfverfahren zur Untersuchung des Alterungsverhaltens, insbesondere zur Qualifizierung neuer Materialien und Komponenten. Für die Prüfung stehen neben den Einrichtungen unseres seit 2006 akkreditierten TestLab PV Modules auch spezielle Prüfanlagen zur Kombination oder Verschärfung von Belastungen zur Verfügung, zum Teil aus eigener Entwicklung.

Mit den vier Phasen des Fraunhofer ISE Qualitätszirkels – Ertragsgutachten, Stichprobenmessungen bei den Modulen, Anlagenprüfung und Performance Check – stellen wir eine umfassende Qualitätssicherung von PV-Modulen und -Kraftwerken sicher. Neben einer guten Planung und dem Einsatz hochwertiger Komponenten ist sie eine entscheidende

Voraussetzung für den effizienten Betrieb und den Ertrag einer PV-Anlage und kann so die »bankability« des vorgelegten Konzepts erhöhen. In der Planungsphase einer PV-Anlage greifen wir auf aussagekräftige Strahlungs- und Wetterdaten zurück und simulieren den Aufbau der Anlage exakt. Unser CallLab PV Modules bietet zur präzisen Messung und Charakterisierung von PV-Modulen verschiedene Standard- und Präzisionsmessungen für Forschung, Entwicklung und Produktion an. Das CallLab PV Modules zählt mit einer Messunsicherheit von weniger als 1,8% bei kristallinen Modulen zu den führenden Labors weltweit. Ist eine PV-Anlage in Betrieb, so gibt eine detaillierte Vor-Ort-Analyse Aufschluss über die momentane Anlagenqualität und die tatsächliche Performance Ratio. Darüber hinaus bietet unser kundenspezifisches PV-Monitoring eine präzise Analyse der Effizienz von Systemen und Komponenten über die komplette Betriebsdauer einer PV-Anlage hinweg an.

Durch Zusammenführung der Kompetenz auf den Gebieten der Photovoltaik und der Energieversorgung von Gebäuden können am Fraunhofer ISE Fragestellungen zur Integration von Solarenergie in Gebäude umfassend bearbeitet werden. Dabei werden neben energetischen und architektonischen Gesichtspunkten auch bauphysikalische, konstruktive und regelungstechnische Aspekte berücksichtigt. Die detaillierte Modellierung des PV-Systems von der Zelle bis zum Wechselrichter bildet die Grundlage für BIPV-Modulentwicklung, Gesamtsystemoptimierung und Systemauslegung.





Thermographische Untersuchung des Solargenerators in einem Photovoltaik-Kraftwerk. Das hochaufgelöste Infrarotbild eines fehlerhaften Moduls ist dem Digitalfoto überlagert und zeigt einzelne Solarzellen mit auffällig erhöhten Betriebstemperaturen. Der Befund ist ein klarer Hinweis auf Ertragseinbußen und auf weitergehende Risiken in der Zuverlässigkeit des betroffenen Moduls.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination	Dr. Harry Wirth	Telefon +49 761 4588-5858 harry.wirth@ise.fraunhofer.de
Modulentwicklung	Dr.-Ing. Ulrich Eitner	Telefon +49 761 4588-5825 pvmod.tech@ise.fraunhofer.de
Modulcharakterisierung	Dipl.-Ing. (FH) Frank Neuberger	Telefon +49 761 4588-5280 pvmod.callab@ise.fraunhofer.de
Gebrauchsdauer von Modulen und Materialien	Dipl.-Phys. Karl-Anders Weiß	Telefon +49 761 4588-5474 pvmod.reliable@ise.fraunhofer.de
Modulprüfung	Dipl.-Ing. (FH) Daniel Philipp	Telefon +49 761 4588-5414 pvmod.testlab@ise.fraunhofer.de
Photovoltaische Kraftwerke	Dipl.-Ing. (FH) Klaus Kiefer	Telefon +49 761 4588-5218 pvmod.powerplant@ise.fraunhofer.de
Bauwerksintegrierte Photovoltaik	Dipl.-Phys. Tilmann Kuhn	Telefon +49 761 4588-5297 pvmod.bipv@ise.fraunhofer.de



LEITFÄHIGES KLEBEN – FLEXIBEL, ZUVERLÄSSIG UND BLEIFREI

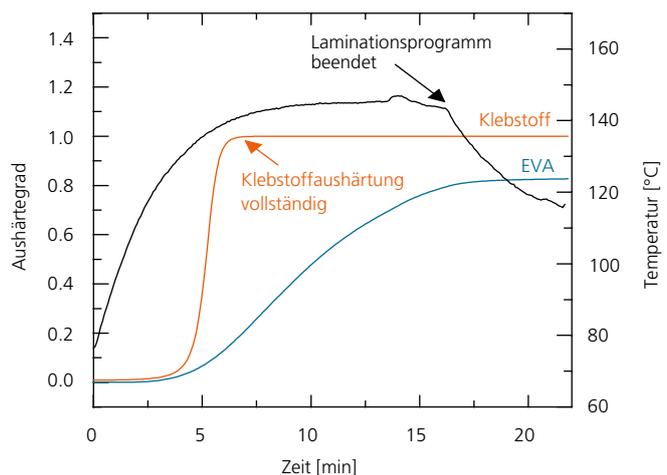
Wie verschaltet man Solarzellen, die man nicht löten kann, im Modul? Man klebt – leitfähig. Das Hightech-Verfahren wird bereits erfolgreich für die Verschaltung von Rückkontaktzellen, Heterojunction-Zellen und Busbar-freien Solarzellen angewendet und bietet Vorteile gegenüber dem Löten. Kleben verbindet mit weniger thermomechanischen Spannungen. Es funktioniert auf einer Vielzahl von neuartigen Metallisierungen und ermöglicht somit neue, hocheffiziente Kontaktstrukturen auf Zellebene. Kleben ist zudem bleifrei und schonend. Aufgabe unseres Kompetenzteams ist, das Material hinsichtlich seiner Prozesseigenschaften und Langzeitstabilität zu untersuchen und auf Klebtechnik basierte Modulkonzepte zu entwickeln, um Hocheffizienz-Zellen verlustfrei und langzeitstabil verschalten zu können.

Ulrich Eitner, **Torsten Geipel**, Harry Wirth

Es besteht großer Forschungsbedarf zu leitfähigen Klebstoffen hinsichtlich der elektrischen und mechanischen Materialeigenschaften. Insbesondere die Reduzierung der Materialkosten, die Klärung von Degradationseigenschaften und die Evaluation neuer Prozessschritte in der Modulherstellung sind Hauptanliegen unserer Arbeit.

Die Aushärtung des Klebstoffs beeinflusst die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Verbindung. Wir haben ein Modell zur Bestimmung der Aushärtekinetik entwickelt, das den Aushärtegrad für ein beliebiges Temperaturprofil berechnen kann. Das autokatalytische Reaktionsmodell wurde mit dynamischer Differenzkalorimetrie parametrisiert. Das Verfahren lässt sich auf die Vernetzungsreaktion von Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA) übertragen, so dass die gleichzeitige Aushärtung des Klebstoffs und des EVA im Laminationsprozess simuliert werden kann.

1 Eine Anwendung des leitfähigen Klebens ist die direkte Kontaktierung der Gitterfinger einer Solarzelle ohne Vorderseiten-Busbars. Dieses Konzept ermöglicht Materialeinsparung unter Verwendung von Standardtechnologien.



2 Simulierte Aushärtung von leitfähigem Klebstoff und EVA.

Eine für die Praxis sinnvolle Anwendung ist z. B. die Berechnung der Aushärtung des Klebstoffs und des EVA beim Laminieren eines Metal-Wrap-Through-Solarmoduls. Abb. 2 stellt die berechnete Aushärtung beider Materialien für ein Laminationsprogramm dar. Es ist zu erkennen, dass der Klebstoff wesentlich früher ausgehärtet ist als das EVA. Der Klebstoff hat also bereits eine hohe Endfestigkeit erreicht, während das EVA noch weich ist. Angesichts des hohen Anpressdrucks beim Laminieren kann dieses kinetische Verhalten zu lokalen mechanischen Belastungen und Bruch der Zelle führen.

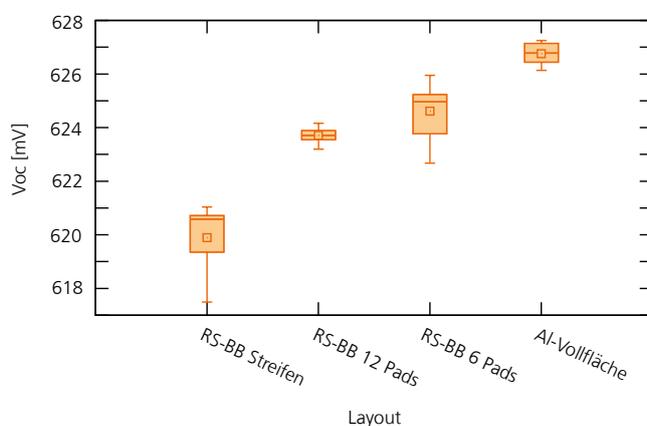
Leitfähiges Kleben ist eine zuverlässige Verbindungstechnologie mit großem Potenzial für die Verschaltung von Hocheffizienz-Solarzellen.



DIREKTES KONTAKTIEREN VON ALUMINIUM DURCH ULTRASCHALLLÖTEN

Im Rahmen unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist es uns gelungen, mittels Ultraschalllötten die Aluminiumrückseitenmetallisierung von kristallinen Siliciumsolarzellen zu kontaktieren. Dank dieser neuen Verbindungstechnologie benötigen Solarzellen keinen rückseitigen Silberkontakt für die Verschaltung mehr. Anstelle des bisher verwendeten Silbers werden Zinnkontakte (Abb. 1) auf die vollflächige Aluminiumrückseite aufgebracht, was die Produktionskosten im Vergleich zu alternativen Prozessen mit Silberpasten um gegenwärtig 3 Eurocent pro Zelle signifikant senkt. Zudem konnte die Zelleffizienz durch den Verzicht auf einen rückseitigen Silberkontakt um 0,2% gesteigert werden (Abb. 2).

Dirk Eberlein, Ulrich Eitner, Peter Schmitt, **Marco Tranitz**, Harry Wirth



2 Rückseiten-Busbar-Layoutvergleich: V_{oc} -Gewinn durch Layoutanpassung.

1 Detailaufnahme: Zinnkontakte auf der Aluminiumrückseitenmetallisierung einer kristallinen Siliciumsolarzelle.

Nach derzeitigem Stand der Technik werden konventionelle Siliciumsolarzellen rückseitig mit einer fast flächendeckenden Aluminiumschicht belegt. Diese Schicht lässt sich mit gewöhnlich genutzten Loten, Flussmitteln, Prozessprofilen und Lötwerkzeugen nicht kontaktieren. Grund dafür ist die sehr stabile Oxidschicht, die die Aluminiumpartikel umgibt. Um die konventionelle Siliciumsolarzelle mit einem Zellverbinder kontaktieren zu können, werden Silberkontakte auf der Zellrückseite aufgebracht, die anschließend mit einem lotummantelten Zellverbinder verlötet werden.

Mit einer neuen Verbindungstechnologie, dem Ultraschalllöten, konnten wir Zinnkontakte auf die Aluminiumschicht der Solarzellenrückseite mechanisch stabil, alterungsbeständig und elektrisch leitfähig aufbringen. Diese können danach mit Standardzellverbindern verlötet werden. Durch die neue Technologie kann auf teure Silberkontakte verzichtet werden. Für das Forschungsprojekt wurden Zellstrings und Module vom 1-Zellen und 16-Zellen bis zum 60-Zellen Format hergestellt. Diese haben wichtige Beständigkeitsuntersuchungen aus der Norm IEC 61215, insbesondere die Temperaturwechsel-, Feuchte-Wärme- und mechanische Lastprüfung bestanden. Mit der neuen Verbindungstechnologie konnten die Kosten deutlich gesenkt werden und noch weitere Effizienzsteigerungen sind möglich.

Die Beständigkeitsuntersuchungen wurden am akkreditierten TestLab PV Modules des Fraunhofer ISE durchgeführt. Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Förderprojekts »Kalus – Kontaktierung von Aluminiumschichten auf Solarzellen« unterstützt und in Kooperation mit der Gebr. SCHMID GmbH bearbeitet.



1

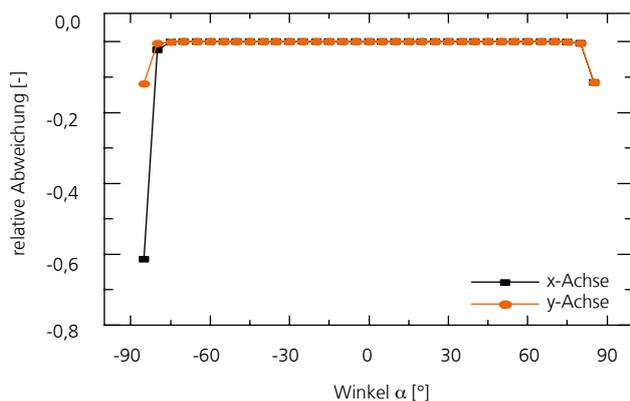
LARGE AREA REFERENZZELLE LARC®

Referenzzellen werden vorzugsweise für die Kalibrierung von Solarzellen, Solarmodulen und Solarsimulatoren verwendet. Konventionelle Referenzzellen nach heutigem Stand der Technik enthalten in der Regel kleine Solarzellen mit speziellen Materialien. Durch diese beiden Einschränkungen sind erhebliche Nachteile – wie begrenzte Messgenauigkeit und Fehleranfälligkeit – vorhanden. Das Konzept der Large Area Referenzzelle (LARC®) ermöglicht den Einsatz der gleichen Zelltechnologie mit ähnlichen Materialien wie das Testobjekt sowie eine große aktive Zellfläche. Aufgrund dieser Vorteile kann auf eine fehleranfällige Nachbearbeitung von Messdaten verzichtet und die Genauigkeit der Messungen verbessert werden.

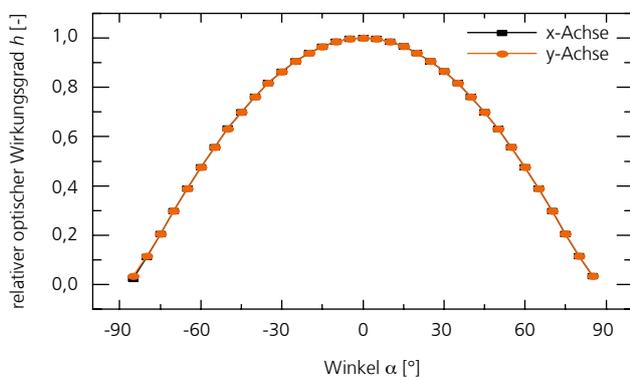
Stefan Brachmann, Thomas Schmidt, **Peter Schmitt**,
Marco Tranitz, Harry Wirth

Unsere großflächige Referenzzelle basiert auf modifizierter Modultechnologie kristalliner Siliciummodule und Komponenten (Solarzelle, Einkapselung etc.) nach Kundenwunsch. Dadurch können fehlerbehaftete Korrekturen vermindert werden. Ferner werden durch den Einsatz einer großflächigen Solarzelle Einflüsse durch Inhomogenitäten von Sonnensimulatoren verringert. Die Referenzzelle verfügt über einen internen präzisen Temperatursensor. Eine spezielle Kontaktisolation ermöglicht die Potenzialtrennung ohne Verlust der thermischen Kontaktierung. Die Referenzzelle wird in ein von uns entwickeltes Gehäuse montiert, um sie vor Umwelteinflüssen zu schützen. Dieses Gehäuse verfügt über eine Kontaktschnittstelle mit robusten Buchsen zum Anschließen der Messleitungen. Die schwarze eloxierte Oberfläche und die Geometrie vermindern Reflexionen und Verschattungen der Solarzelle.

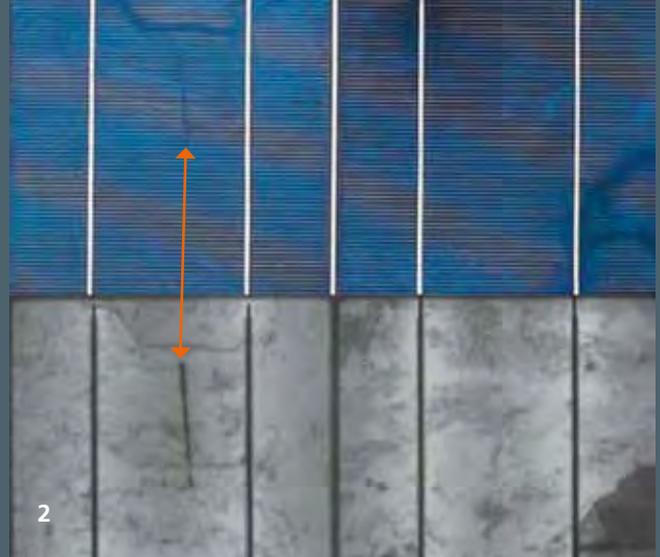
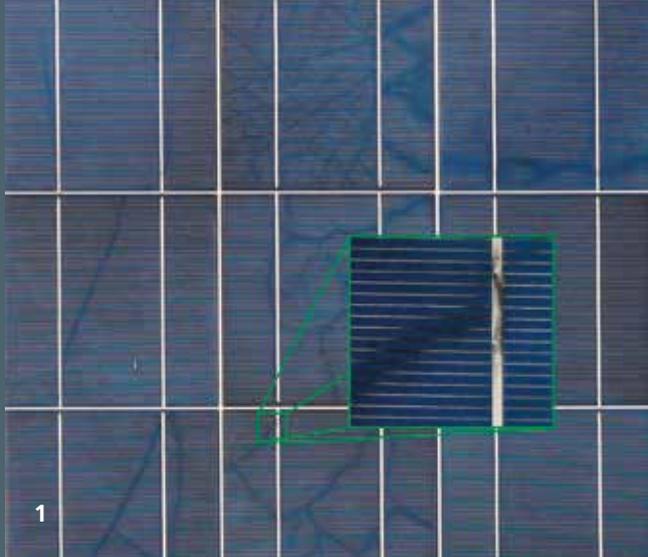
1 LARC®-Konstruktion mit kommerziell verfügbarer kristalliner Solarzelle in den Dimensionen von 156 mm x 156 mm, Deckglas, Rahmen und Anschlussbox.



2 Die relative Abweichung einer LARC® mit und ohne Rahmen zeigt die Abschattung der Zelle aufgrund des Rahmens in verschiedenen Winkeln gedreht um die x- und y-Achse.



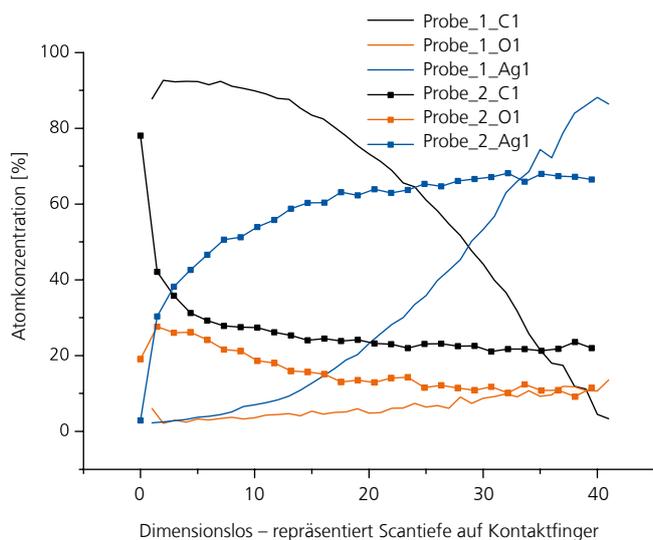
3 Raytracing Ergebnisse des relativen optischen Wirkungsgrads inkl. der Kosinusverluste in Abhängigkeit des Winkels um die Drehachse (x- und y-Achse). Es sind keine sichtbaren Reflexionseinflüsse durch den Rahmen erkennbar.



SCHADENSANALYTIK AN PV-MODULEN AM BEISPIEL »SCHNECKENSPUREN«

Materialfehler, Fertigungsmängel oder unsachgemäße Handhabung sind nur einige Gründe, die zu Veränderungen der optischen und elektrischen Eigenschaften von PV-Modulen führen können. Daraus ergeben sich häufig Fragen nach der Ursache, den langfristigen Auswirkungen oder der Verletzung von Herstellergarantien. Sogenannte »Schnecken Spuren« (Abb. 1) sind ein Beispiel für Effekte, die wir untersuchen, um durch Identifizierung der Prozessmechanismen zur Vermeidung solcher Schädigungen beizutragen.

Ines Dürr, Stephan Hoffman, **Cornelia Peike,**
Daniel Philipp, Harry Wirth



3 Tiefenprofil der Auger-spektroskopischen Untersuchung an extrahierten Kontaktfingern. Bei Probe 1 steigt die Sauerstoffkonzentration mit der Silberkonzentration an, was als Hinweis auf Silberoxidbildung interpretiert wurde. Die zweite Probe bestätigte dies nicht. Auch hier ist ein erhöhtes Sauerstoffsignal sichtbar, das zusammen mit dem Kohlenstoffsignal des Einkapselungsmaterials abfällt.

1 Stark verfärbte Kontaktfinger und Leiterbändchen nach künstlicher Alterung.

2 An der markierten Stelle wurde durch mechanische Einwirkung ein künstlicher Zellschaden herbeigeführt. Dort entstand nach künstlicher Alterung eine neue »Schnecken Spur«.

Als »Schnecken Spuren« werden linienförmige Verfärbungen auf den Zellen von PV-Modulen bezeichnet. Bei genauer Betrachtung wird deutlich, dass es sich dabei um eine Dunkelfärbung der Kontaktfinger handelt. Die Untersuchung auffälliger Module mit Hilfe der Elektrolumineszenzanalyse zeigte eine Korrelation zwischen dem Auftreten der Verfärbungen und Zellbrüchen. Dabei waren die Spuren bei unterschiedlichen Modulen oft unterschiedlich stark ausgeprägt. Häufig ist an Modulen mit Schnecken Spuren auch eine Verfärbung im Randbereich der Zellen sichtbar. Mittels Raman-spektroskopischer Untersuchungen konnte ein Zusammenhang von Zellbrüchen und Verfärbungen der Kontaktfinger bestätigt werden. Die Analyse erbrachte den Nachweis eines auf Diffusion von Sauerstoff zurückzuführenden Reaktionsprozesses im EVA.

Aus zwei Modulen wurden Proben verfärbter Kontaktfinger extrahiert und einer Auger-spektroskopischen Analyse (AES) unterzogen. In einem Fall wurden Hinweise auf die Bildung eines Oxids auf der Oberfläche der Kontaktfinger gefunden. Die Messung am zweiten Modul zeigte auch eine höhere Sauerstoffkonzentration, aber nicht auf der Oberfläche des Kontaktfingers, sondern in den Resten des Verkapselungspolymeres (EVA) (Abb. 3). Parallel zu den analytischen Untersuchungen wurden auch Belastungsprüfungen durchgeführt, wobei vor den Belastungen zusätzliche Zellbrüche in den Modulen generiert wurden (Abb. 2). Auch hier zeigte sich kein einheitliches Verhalten. In der Feuchte-Wärme-Prüfung verschwanden die Verfärbungen an manchen Modulen, an anderen nicht. UV-Belastungsprüfungen an betroffenen und neuen Modulen führten in einigen Fällen zum Entstehen von Verfärbungen.



UV-STABILITÄT VON POLYMERMATERIALIEN IN PV-MODULEN

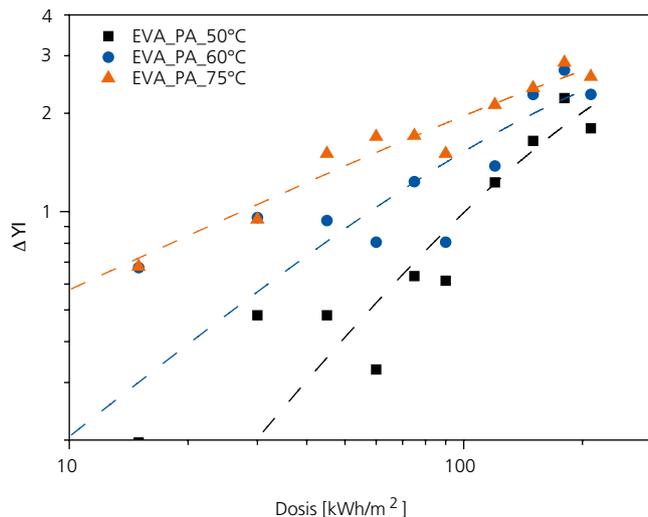
PV-Module sind im Betrieb unterschiedlichen Degradationsfaktoren ausgesetzt. Für Polymermaterialien ist dabei besonders die schädigende Wirkung von UV-Strahlung relevant. Die Untersuchung der UV-Stabilität von Polymermaterialien in PV-Modulen ist deshalb eine wichtige Aufgabe des Verbundforschungsprojekts »Zuverlässigkeit von PV-Modulen II«. Am Fraunhofer ISE – das auch das Projekt koordiniert – finden Arbeiten zur UV-Stabilität der Materialien und zerstörungsfreien Untersuchungsverfahren statt, mit dem Ziel, die Gebrauchsdauer von PV-Modulen zu prognostizieren. Die Ergebnisse zeigen klar, dass die Wechselwirkung der verwendeten Materialien und des Modulaufbaus die Materialalterung beeinflusst.

Konstantin Apin, Myriam Hummel, Michael Köhl, **Cornelia Peike**, Karl-Anders Weiß, Harry Wirth

Zur Untersuchung der UV-induzierten Alterung von Polymermaterialien in PV-Modulen und dem Einfluss der Temperatur auf die laufenden Alterungsprozesse wurden Versuchsreihen durchgeführt, die einerseits das Spektrum der UV-Strahlung variierten und andererseits verschiedene Prüflingstemperaturen verwendeten. Die Prüflinge sind analog zu industriell gefertigten PV-Modulen (Abb. 1) aufgebaut und bestehen aus Solarglas, verschiedenen Einkapselungsmaterialien (Polyolefine und EVA) sowie Rückseiten mit unterschiedlicher Feuchtedurchlässigkeit (Polyamid und Glas).

Die Transmission der Materialien bleibt bis zu einer UV-Dosis von 150 kWh/m² unverändert, was etwa zwei Jahren Exposition in Mitteleuropa entspricht. Bis 180 kWh/m² trat ein leichter Rückgang der Transmission auf. Dieser Rückgang war bei den Laminaten mit dichter Rückseite (Glas-Glas) für alle Prüftemperaturen vergleichbar. Bei den Laminaten mit permeabler Rückseite zeigte sich in den zerstörungsfreien

- 1 Neben Vergilbungen können an PV-Laminaten unter anderem auch kristallförmige Delaminationen auftreten.
- 2 Raman-spektroskopische Untersuchung des Einkapselungspolymeres eines Prüflings durch das Frontglas hindurch.



- 3 Entwicklung der Vergilbung (Yellowness-Index YI) von EVA-Einkapselungsmaterialien mit PA-Rückseite in Abhängigkeit der UV-Dosis und Temperatur.

Raman-spektroskopischen Messungen (Abb. 2) ein deutlicher Einfluss der Temperatur auf die entstehende Fluoreszenz, die ein Indikator für Polymeralterung ist. Zudem wurde festgestellt, dass die Vergilbung der Glas-Glas-Laminare stärker ist als die der Laminare mit PA-Rückseite, was einen bedeutenden Einfluss der Permeationseigenschaften der Rückseitenmaterialien auf die Alterung der Einkapselung nahelegt.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und der Solar Fabrik AG, Solarwatt GmbH, Bosch Solar Energy AG, SolarWorld AG und Solon Energy GmbH unterstützt.



PRÄZISE LEISTUNGS- UND PERFORMANCE-BEWERTUNG VON PV-KRAFTWERKEN

Die Ermittlung der Performance Ratio (PR) eines PV-Kraftwerks ist eine häufige Aufgabe aus der Praxis, sei es zum Zeitpunkt der Inbetriebnahme, des Ablaufs von Gewährleistungsfristen oder eines Verkaufs. Das Fraunhofer ISE hat ein Verfahren entwickelt – und bei konkreten Großprojekten erfolgreich getestet – mit dem der Jahreswert der Performance Ratio innerhalb weniger Wochen mit hoher Genauigkeit ermittelt werden kann. Durch den temporären Einsatz von kalibrierter und präziser Messtechnik werden gleichzeitig die Daten des kraftwerkseigenen Monitorings validiert. Damit können bereits vorliegende wie auch zukünftige Betriebsdaten zur unabhängigen Performance-Bewertung durch das Fraunhofer ISE genutzt werden.

Klaus Kiefer, Björn Müller, Christian Reise, Andreas Steinhüser, Harry Wirth

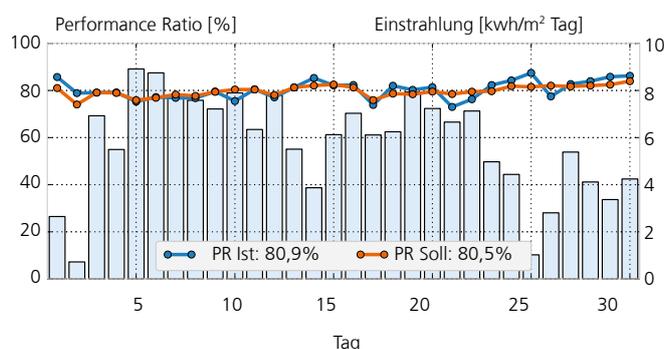
1 Kalibrierte Einstrahlungssensoren zur Validierung der installierten Messtechnik.

2 Mobile hochpräzise Messtechnik.

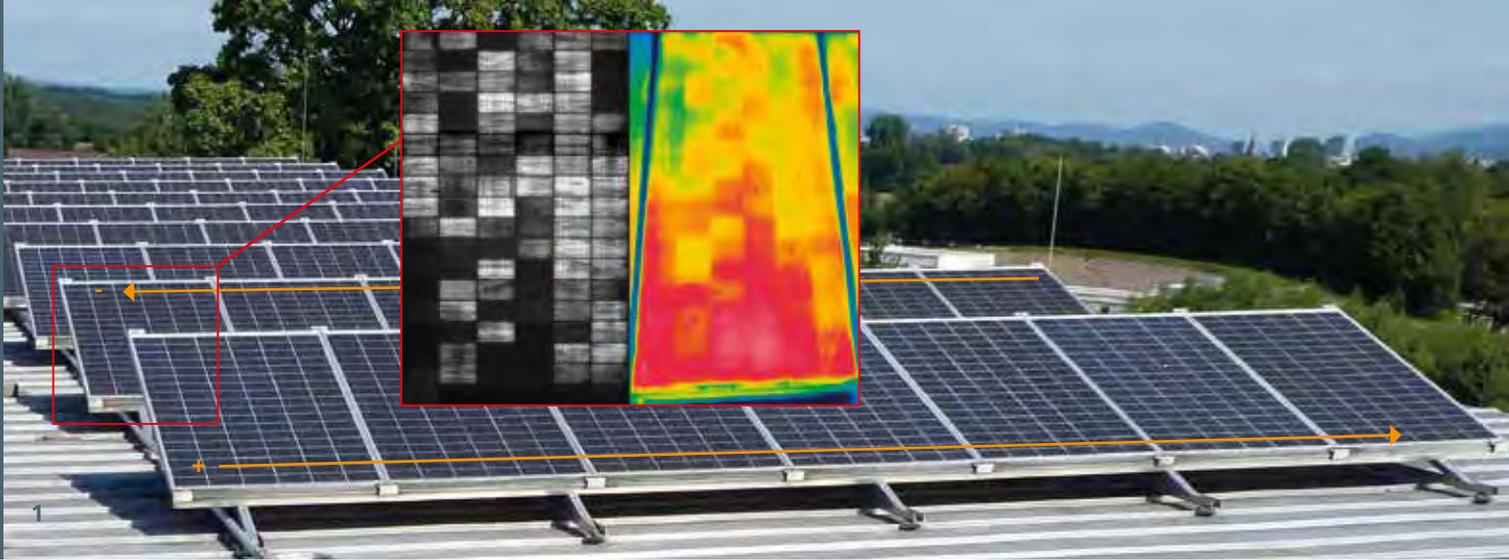
Die Daten aus dem Betriebsmonitoring des Betreibers werden durch den Einsatz hochpräziser Messtechnik (Abb. 1 und 2) analysiert, validiert und gegebenenfalls korrigiert. Diese Daten dienen anschließend zur Ermittlung der aktuellen Performance Ratio (PR Ist) des Kraftwerks. Die aufgezeichneten Wetterdaten werden dann in ein bereits beim Ertragsgutachten verwendetes oder anlagenspezifisch neu zu erstellendes Modell eingespeist. So kann der Soll-Wert der Performance Ratio (PR Soll) ermittelt und mit dem Ist-Wert verglichen werden.

Um eine hohe Genauigkeit zu erreichen, werden vor Ort die Anlagenkonfiguration und die Verschattung des Solargenerators überprüft und mögliche Abweichungen gegenüber den Planungsdaten erfasst. Zur Ermittlung des Anlagenertrags verwenden wir die hochgenauen Werte des geeichten Zählers vom Netzbetreiber und die von uns validierten Einstrahlungswerte. Die Temperaturkoeffizienten und das Schwachlichtverhalten der Module werden mittels Präzisionsmessungen in unserem Messlabor bestimmt.

Das neu entwickelte Verfahren bietet weitere Analyse- und Anwendungsmöglichkeiten. So können Ertragsdaten über einen längeren Zeitraum auch rückwirkend beurteilt, die Bewertung des ersten Betriebsmonats statistisch auf ein typisches Betriebsjahr hochgerechnet oder Ertragseinbußen durch netzseitige Abregelung quantifiziert werden.



3 Grafische Darstellung des PR-Verlaufs (Soll- und Ist-PR) eines Multi-Megawatt Solarkraftwerks.



PID – THEORIE UND PRAXIS

Potentialinduzierte Degradation (PID) kann als Überbegriff für Alterungserscheinungen verstanden werden, die durch die Potentialdifferenz zwischen Zellen und Erdung entstehen. In den vergangenen Jahren ist eine Form des PID an kristallinen PV-Modulen beobachtet worden, die zu einem Leistungsrückgang führen kann, ohne dass das Modul äußerlich sichtbare Schäden aufweist. Umgangssprachlich wird dieser Effekt häufig mit PID gleichgesetzt. Am Fraunhofer ISE werden die Ursachen und treibenden Faktoren für das Entstehen dieses Effekts erforscht sowie sein Einfluss auf die Erträge von PV-Generatoren.

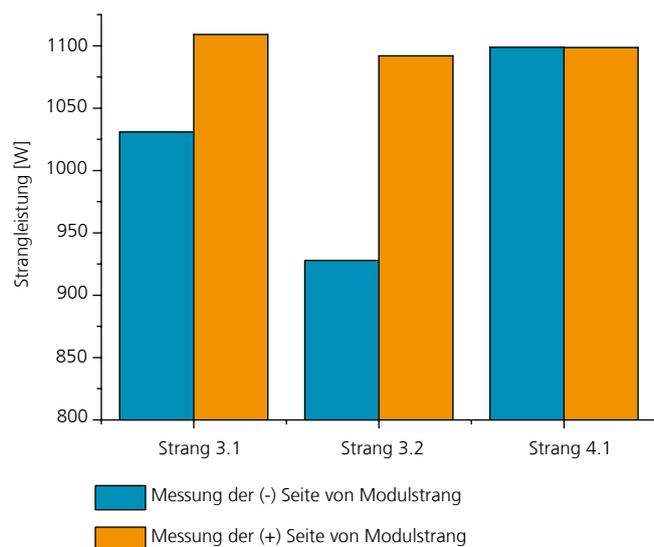
Sönke Dohse, Stephan Hoffmann, Klaus Kiefer, Daniel Philipp, Andreas Steinhüser, **Carola Völker**, Harry Wirth

Aufgrund der Spannung zwischen Zellen und Erdung (Rahmung / Frontglas) kann eine Wanderung positiver Ionen in die Solarzelle stattfinden. Dadurch wird die Leistung reduziert. Aktuell untersuchen wir verschiedene Entstehungsmechanismen und Modelle für dieses Phänomen.

Den Einfluss von Umweltfaktoren – wie Klima und Verschmutzung – auf den PID-Effekt messen wir seit 2011 in der Freibewitterung an Standorten auf Gran Canaria und in Freiburg. Neben den Untersuchungen auf Zell- und Modulebene wird seit dem vergangenen Jahr auch die Systemebene betrachtet. Damit soll der tatsächliche Einfluss von PID auf den Ertrag von Anlagen bestimmt werden, in denen PID-sensitive Module verbaut sind.

Die Ausprägung des PID-Effekts wird durch Leistungsmessungen und Thermographie-Aufnahmen vor Ort bestimmt, unter Berücksichtigung standort- und klimaspezifischer Faktoren. Weitere Tests werden im Labor an besonders auffälligen Modulen durchgeführt.

1 Generator mit auffälligen Modulen im Großraum Freiburg.



2 Leistungswerte der Messungen an Halbsträngen an einer von PID betroffenen Anlage.

Abb. 2 zeigt die Leistungswerte von halbseitig gemessenen Modulsträngen einer untersuchten PV-Anlage. Es ist zu erkennen, dass die minusseitigen Halbstränge von 3.1 und 3.2 eine deutlich verminderte Leistung generieren. Die PID-Empfindlichkeit der Module wurde im Labor nachgewiesen. Strang 4.1 ist unauffällig.

Wir untersuchen auch die Reversibilität des PID-Effekts. Beispielsweise wird nach einer vollständigen Erholung ein PID-Test auf Basis des aktuellen IEC-Normentwurfs 62804 an den Modulen durchgeführt. Durch Vergleich der tatsächlichen und der künstlich hervorgerufenen Schädigung können die Ergebnisse des PID-Tests im Labor qualitativ eingeordnet werden.

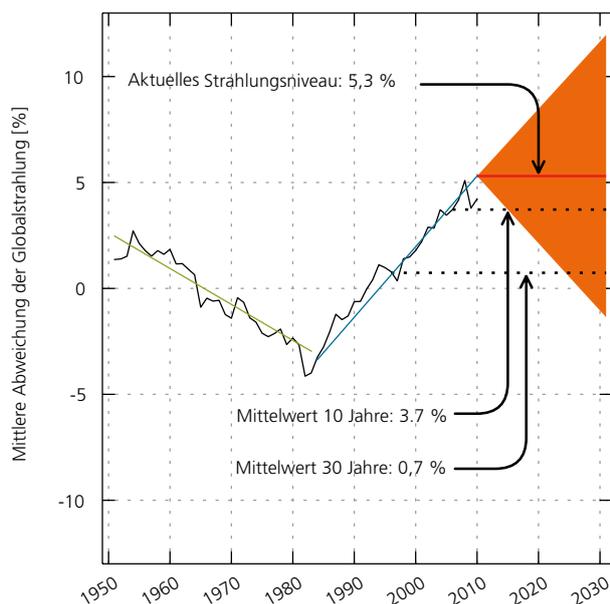


PV-KRAFTWERKE PRODUZIEREN MEHR STROM ALS ERWARTET

Wichtigste Eingangsgröße für Ertragsgutachten ist die Einstrahlung am jeweiligen Standort. Die Globalstrahlung auf der Erdoberfläche unterliegt allerdings langfristigen Veränderungen, einem Phänomen, das unter dem Namen »Global Dimming and Brightening« bekannt ist. In Deutschland und weiten Teilen Europas ist seit Anfang der 1980er Jahre ein Anstieg der Solarstrahlung (Brightening) zu beobachten. Da bei Gutachten bisher die Mittelwerte der Solarstrahlung über einen Zeitraum von 30 Jahren verwendet wurden, liegen die tatsächlichen Erträge deutlich über den Prognosen. Aktuelle Zeitreihen aus Satellitendaten erlauben es, diesen Trend in Gutachten entsprechend zu berücksichtigen.

Anton Driesse, Laura Hardt, Klaus Kiefer, **Björn Müller**, Christian Reise, Harry Wirth

Das Fraunhofer ISE hat in Kooperation mit Wissenschaftlern der ETH Zürich und des Deutschen Wetterdienstes (DWD) die



1 Photovoltaik-Kraftwerk.

langjährige Entwicklung der Globalstrahlung in Deutschland untersucht. Dazu wurden Bodenmesswerte verschiedener Stationen des DWD ausgewertet. Die Untersuchung bestätigt langjährige Trends der Globalstrahlung am Erdboden (»Global Dimming and Brightening«) und kommt zu dem Ergebnis, dass das aktuelle Strahlungsniveau in Deutschland etwa 5% über dem langjährigen Mittelwert liegt (Abb. 2). Als Ursache für diese Schwankungen werden hauptsächlich Veränderungen des Aerosolgehalts der Atmosphäre und bei der Wolkenbildung angesehen. Ertragsgutachten für PV-Anlagen verwenden bisher möglichst langfristige Mittelwerte der Solarstrahlung aus der Vergangenheit, um die erwartete Einstrahlung in der Zukunft zu prognostizieren. In Deutschland werden dazu in der Regel 30jährige Mittelwerte des DWD verwendet. Das aktuelle Solarstrahlungsniveau wird dadurch jedoch nicht ausreichend berücksichtigt. Anhand von langjährigen Globalstrahlungs- und Leistungsmessungen in kommerziell betriebenen Großkraftwerken aus dem Monitoring des Fraunhofer ISE konnte gezeigt werden, dass es durch die Verwendung der 30jährigen Mittelwerte in Ertragsgutachten zu einer Unterschätzung der Erträge um 4–5% kommt. Da derzeit noch keine realistischen Prognosen zur zukünftigen Entwicklung der Solarstrahlung möglich sind, das aktuelle Globalstrahlungsniveau allerdings über dem Mittelwert liegt, verwendet das Fraunhofer ISE Satellitendaten der letzten abgeschlossenen zehn Jahre für seine Ertragsgutachten.

2 Jährliche Abweichungen der Globalstrahlung vom Mittelwert 1951–2010 in Deutschland (gleitender Durchschnitt: schwarze Linie). Linearer Trend der Dimming- und der Brightening-Phase: grüne bzw. blaue Linie. Der 30jährige Mittelwert unterschätzt das aktuelle Strahlungsniveau. Der 10jährige Mittelwert liegt nur leicht unter dem aktuellen Strahlungsniveau.



BETRIEBSVERHALTEN VON KOMPLEXEN BIPV-ANLAGEN MIT a-Si/μ-Si-MODULEN

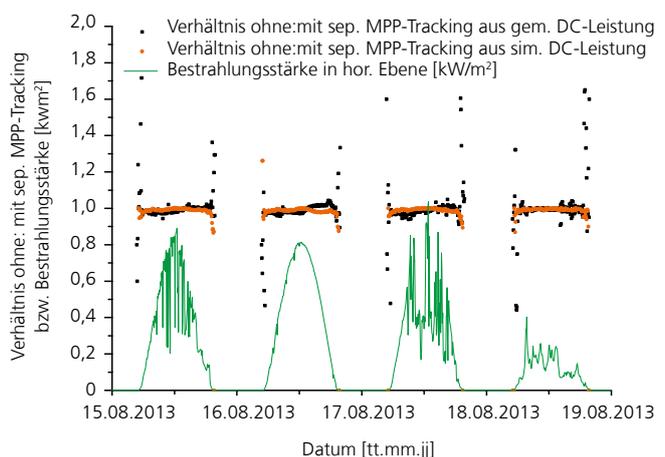
Im Rahmen des vom Fraunhofer ISE koordinierten Forschungsprojekts »Solarvalley-BIPV« wurden sowohl neuartige BIPV-Bauteile als auch Methoden für detaillierte Ertragsanalysen von bauwerksintegrierten Photovoltaikanlagen (BIPV) entwickelt. Zudem wurden qualitativ hochwertige Messdatensätze an zwei netzgekoppelten Anlagen mit a-Si/μ-Si-Modulen gesammelt. Aus dem Vergleich der simulierten Ergebnisse mit den Messdaten werden Erkenntnisse für die BIPV-Komponentenentwicklung und Ertragsoptimierung unter typischen BIPV-Bedingungen – wie erhöhten Modultemperaturen und unterschiedlich orientierten Teilanlagen – gewonnen.

Anselm Kröger-Vodde, Tilmann Kuhn, Nicole Römer, Wendelin Sprenger, **Helen Rose Wilson**, Hans-Martin Henning

Erstmals wurde das vom Fraunhofer ISE entwickelte Konzept der winkelselektiven PV-Verglasung PVShade® in einer BIPV-Pilotanlage umgesetzt. Zehn PVShade®-Dreifach-Isolierverglasungen mit einer Gesamtfläche von etwa 15 m² wurden am Neubau des Fraunhofer ISE in Freiburg eingebaut. Die Winkelselektivität wird dadurch erreicht, dass zwei Dünnschichtmodule, die jeweils ein identisches Streifenmuster aufweisen, mit einer Versetzung der Streifen aufeinander laminiert werden. Der winkelselektive Aufbau sorgt für Durchsicht nach außen und bietet gleichzeitig saisonalen und tageszeitabhängigen Sonnenschutz (Abb. 1).

Für die Ertragssimulation wurden der geometrisch komplexe Aufbau der Module und die Verschattung durch einen benachbarten Gebäudeflügel mit Hilfe von Strahlverfolgungsberechnungen berücksichtigt. Die Auswirkung hoher Modultemperaturen und das Zusammenspiel zwischen Modulen und Wechselrichter wurden ebenfalls modelliert. Die Übereinstimmung der Messwerte aus dem wissenschaftlichen Monitoring

- 1 Winkelselektive PVShade®-Dreifachverglasungen in der Brüstung.
- 2 Unterschiedlich ausgerichtete, vertikale a-Si/μ-Si-Module bei MasdarPV in Ichtershausen.



- 3 Verhältnis der DC-Leistung von der Anlage in Ichtershausen aus zusammenschalteten, östlich/westlich orientierten, vertikalen Modulsträngen ohne/mit getrenntem MPP-Tracking; schwarz: aus gemessenen DC-Leistungswerten, rot: aus simulierten Werten, grün: Bestrahlungsstärke in horizontaler Ebene.

mit den simulierten DC-Stromstärkewerten war mit einer durchschnittlichen Differenz von weniger als 3% sehr gut.

Die Auswirkung der Zusammenschaltung unterschiedlich ausgerichteter Modulflächen wird bei einer weiteren a-Si/μ-Si-Anlage untersucht (Abb. 2). Die Messergebnisse wie auch die Ertragssimulationen für das Jahr bis September 2013 lieferten beide einen elektrischen Mismatch-Faktor kleiner 1% (Abb. 3). Für kleine Anlagen ist der Zusatzaufwand für getrenntes MPP-Tracking bei jeder Ausrichtung demnach kaum gerechtfertigt.

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

SOLARTHERMIE



Bei einer Umstellung der Energiesysteme auf höhere Anteile erneuerbarer Energien ist die Solarwärme ein zentraler Baustein. Wie diese Rolle in verschiedenen Volkswirtschaften und Klimazonen ausgefüllt wird, hängt auch an der Kostenentwicklung in Produktion und Vertrieb. Forschung und Entwicklung kann ihren Anteil dazu leisten, indem kostengünstigere Materialien, Produktionsverfahren und in Bezug auf Investition und Ertrag optimierte Gesamtsysteme entwickelt werden.

Das Geschäftsfeld Solarthermie umfasst den gesamten Markt von Nieder- bis Hochtemperaturanwendungen. Solarthermische Flach- und Vakuumröhrenkollektoren haben vielseitige Anwendungen von der Brauchwasser- und Solarheizungsanlage bis zur Kühlung und Kälteerzeugung. In Bezug auf den Wettbewerb mit der Photovoltaik in der Fläche sind Neuentwicklungen bei fassadenintegrierten Kollektoren oder Kollektoren mit kombinierter photovoltaischer Stromerzeugung wichtig. Mit linear konzentrierenden Kollektoren können Betriebstemperaturen von 150 °C bis zu 550 °C erreicht werden. Sie werden nicht nur für solarthermische Großkraftwerke eingesetzt, sondern auch in kostengünstigeren Varianten für die Erzeugung von Prozessdampf.

Seit vielen Jahren entwickeln wir langzeitstabile selektive Absorberschichten und transferieren sie in die Industrie. Mit dem Ziel der Kostensenkung untersuchen wir auch Alternativen zu Aluminium und Kupfer, z. B. Stahl, aber auch nicht-metallische Werkstoffe wie UHP-Beton und Kunststoff. Auf Basis dieses Ansatzes ergeben sich auch gänzlich neue Konstruktions- und Fertigungsmöglichkeiten für solarthermische Kollektoren.

2013 haben wir die Aktivitäten zur dezentralen Wasseraufbereitung, von thermischer Membrandestillation, Ultrafiltration und Umkehrosmose zusammengeführt. Mit Hilfe von Kollektoren und Photovoltaik können wir auch völlig autarke Systeme, optimiert für die jeweilige Wasserqualität, aufbauen. Unsere Expertise wollen wir in Zukunft auch bei der Trennung industrieller Stoffsysteme einsetzen.

Solarthermische Kraftwerke besitzen in Ländern mit hoher Direktstrahlung ein riesiges Potenzial, Solarstrom flexibel sowohl für den Tagesspitzenbedarf als auch für Zeiten erhöhter Last kostengünstig zu erzeugen. Erreicht wird dies über Hybridisierung (Verbindung mit brennstoffgebundenen Wärmeerzeugern) oder über thermische Speicherung, an der wir intensiv arbeiten.

Das Fraunhofer ISE verfügt über Kompetenzen von Materialwissenschaft, Komponentendesign, Charakterisierungs- und Prüfverfahren, theoretischer Modellierung und Simulation, bis hin zur Systemtechnik bei den verschiedenen Anwendungen.

Besondere Einrichtungen im Geschäftsfeld Solarthermie:

- Vakuumbeschichtungsanlage zur industrienahen Herstellung komplexer Absorber- und Spiegelprototypen auf ebenen und gekrümmten Flächen und Rohren (140 x 180 cm²)
- materialtechnische Messtechnik (REM, Auger, EDX) zur Untersuchung von Veränderungen der Schichten durch thermische oder andere Belastungen
- optische Messtechnik: Spektrometrie, Goniometrie, bildgebende Verfahren, Deflektometrie, Konzentratoroptiken
- wärmetechnisches Labor zur transienten Vermessung von Wärmekraftmaschinen (bis etwa 50 kW_{el}) und Hochtemperaturspeichern
- Testlabor für Membrandestillation, auch Seewasserfestigkeit, sowie Wasserlabor
- TestLab Solar Thermal Systems: zertifiziertes solarthermisches Prüflabor für Kollektoren und Systeme nach Solar Keymark





Scheffler-Reflektor zur Erzeugung von Heißdampf zum Betrieb einer 1 MW-Turbine mit Abwärmenutzung in Rajasthan, Indien.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Werner Platzer

Telefon +49 761 4588-5983
 werner.platzer@ise.fraunhofer.de

Thermische Solaranlagen

Dr. Wolfgang Kramer

Telefon +49 761 4588-5096
 soltherm.systems@ise.fraunhofer.de

Gebrauchsdauer von Kollektoren und Komponenten

Dipl.-Phys. Karl-Anders Weiß

Telefon +49 761 4588-5474
 soltherm.reliable@ise.fraunhofer.de

Wärmeübertragung und Wärmetransport

Dr.-Ing. Michael Hermann

Telefon +49 761 4588-5409
 soltherm.transfer@ise.fraunhofer.de

Solare Kälteerzeugung

Dipl.-Phys. Edo Wiemken

Telefon +49 761 4588-5412
 soltherm.cooling@ise.fraunhofer.de

Solare Prozesswärme

Dr. Werner Platzer

Telefon +49 761 4588-5983
 soltherm.process@ise.fraunhofer.de

Solarthermische Kraftwerke

Dr. Thomas Fluri

Telefon +49 761 4588-5994
 soltherm.power@ise.fraunhofer.de

Solarthermische Fassaden

Dr.-Ing. Christoph Maurer

Telefon +49 761 4588-5667
 soltherm.facade@ise.fraunhofer.de

Dezentrale Wasseraufbereitung

Dr.-Ing. Joachim Koschikowski

Telefon +49 761 4588-5294
 soltherm.water@ise.fraunhofer.de



THERMOAKTIVE BAUTEILE AUS ULTRAHOCHLEISTUNGSBETON (UHPC)

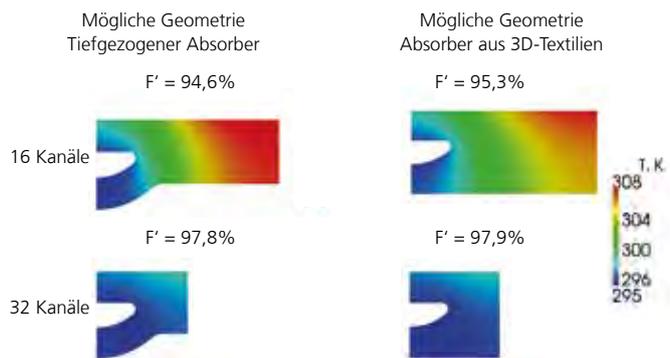
Im Rahmen des Forschungsprojekts »TABSOLAR« entwickelt das Fraunhofer ISE neuartige fluiddurchströmte Bauteile auf Basis von Ultrahochleistungsbeton (UHPC). Mit innovativen Fertigungsmethoden sollen multifunktionale Komponenten wie gebäudeintegrierte Solarkollektoren oder thermoaktive Bauteilsysteme (TABS) für Neubauten und Bestandssanierung entstehen. Auf ersten UHPC-Proben haben wir bereits erfolgreich eine spektralselektive Beschichtung aufgebracht. Des Weiteren konnten unsere thermischen Simulationen zeigen, dass auch mit UHPC bei geeigneter Auslegung eine hohe thermische Effizienz zu erwarten ist.

Paolo Di Lauro, **Michael Hermann**, Carmen Jerg, Doreen Kalz, Angelina Katsifaraki, Franziska Kennemann, Lotta Koch, Eric Laurenz, Christoph Maurer, Lena Schnabel, Dominik Wystrcil, Werner Platzer

In dem Verbund-Forschungsprojekt »TABSOLAR« verfolgen wir gemeinsam mit fünf Projektpartnern den Ansatz, multifunktionale Niedertemperatur-Bauteile als Wände, Decken oder Böden zu entwickeln, die mechanische (z. B. tragende Wand), thermisch aktive (von Fluid durchströmt), thermisch passive (Wärmedämmung) sowie gestalterische Funktionalität (Struktur, Farbe, Beschichtung) aufweisen. Basis für das neuartige Konzept ist ein Ultrahochleistungsbeton (Ultra High Performance Concrete, UHPC), der zu sehr filigranen, Materialsparenden und gleichzeitig hochfesten Bauteilen verarbeitet werden kann.

Im Rahmen des Projekts werden parallel zwei mögliche neue Fertigungstechnologien untersucht: ein von uns entwickeltes, patentiertes Membran-Vakuumtiefziehverfahren und das Umgießen dreidimensional gestrickter Kanäle. Die Kanalstrukturen werden mit Hilfe unseres FracTherm®-Verfahrens erstellt. Wir haben erste UHPC-Proben erfolgreich spektralselektiv

1 *Platte aus UHPC mit spektralselektiver Beschichtung, die mit unserer Sputteranlage aufgebracht wurde. Der Absorptionsgrad der noch nicht optimierten Schicht α liegt um 94%, der Emissionsgrad $\epsilon_{100^\circ\text{C}}$ um 10%, was bereits sehr gut ist.*

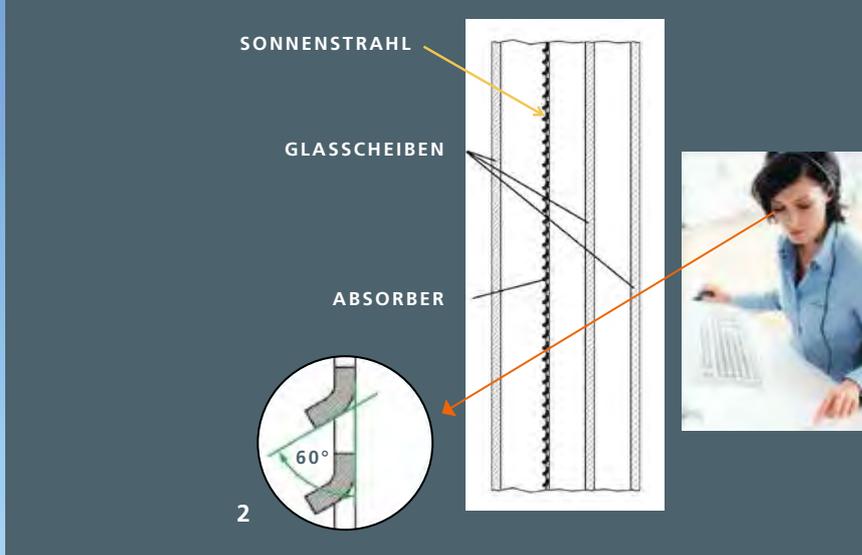


2 *Temperaturverteilung und Kollektorwirkungsgradfaktor F' für beispielhafte Kanalgeometrien (stationär). Die Anzahl der Kanäle bezieht sich auf 1 m Absorberbreite. Die Kanalhöhe innen beträgt 4 mm.*

beschichtet (Abb. 1). UHPC weist im Vergleich zu Metallen geringe Wärmeleitfähigkeiten auf, die wir bei 20 °C zu 1,9 W/(mK) und bei 100 °C zu 1,6 W/(mK) bestimmt haben. Wir haben daher thermische Modelle erstellt und numerische Simulationen durchgeführt, um den Kollektorwirkungsgradfaktor F' zu bestimmen, der ein Maß für die thermische Effizienz eines Solarabsorbers darstellt (Abb. 2). Die ermittelten Werte liegen im Bereich des Stands der Technik von typischen metallischen Solarabsorbern oder besser.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.

www.tabsolar.de

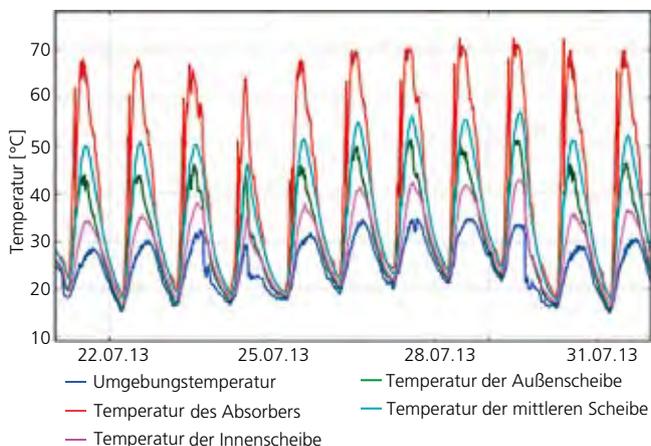


HEIZEN UND KÜHLEN MIT TRANSPARENTEN FASSADENKOLLEKTOREN

Im europäischen Forschungsprojekt »Cost-Effective« wurden neue bauwerkintegrierte Solarsysteme entwickelt und in Pilotgebäuden umgesetzt. Nach Projektende wurden die Messergebnisse eines Kollektorfelds mit teiltransparenten solarthermischen Fassadenkollektoren weiter analysiert. Dabei zeigt sich, dass die transparenten Kollektoren sowohl zur Heizung – mittels thermisch aktivierter Bauteilsysteme (TABS) – als auch zur solaren Kühlung – durch eine Adsorptionskältemaschine – beitragen können. Als wichtigste Erkenntnis bleibt jedoch, dass der Wärmestrom zwischen dem Kollektor und dem Innenraum ähnlich gering ist, wie bei konventionellen Sonnenschutzverglasungen.

Paolo Di Lauro, Damien Gasnier, Michael Hermann, Tilmann Kuhn, **Christoph Maurer**, Thibault Pflug, Hans-Martin Henning

Abb. 1 zeigt die teiltransparenten Kollektoren, die die Fassade eines Treppenhauses ersetzen. Wie in Abb. 2 dargestellt,



3 Durchschnittstemperaturen der verschiedenen Kollektorschichten.

1 Teiltransparente solarthermische Fassadenkollektoren, Pilotinstallation in Slowenien.

2 Schematische Zeichnung eines teiltransparenten Kollektors mit drei Glasscheiben und einem teiltransparenten Absorber mit lamellenförmigen Öffnungen.

bestehen die Kollektoren aus drei Glasscheiben und einem Absorber, der mit lamellenförmigen Öffnungen versehen ist. Während die Lamellen durch ihre Neigung die Solarstrahlung besonders gut absorbieren können, bieten die Öffnungen Sichtkontakt zwischen innen und außen. Die Zusatzkosten im Vergleich zu einer konventionellen Fassade mit drei Glasscheiben liegen bei nur 10–15%. Im Winter strahlt die tieferliegende Sonne besser durch die Lamellenöffnungen und trägt zur Gebäudeheizung bei, während im Sommer wenig direktes Sonnenlicht durch die Lamellen ins Gebäude dringt und es so kaum aufheizt. Im Vergleich zu einer opaken Wand kann ein transparenter Kollektor den jährlichen Energieverbrauch senken und ermöglicht Sichtkontakt nach außen.

Abb. 3 stellt die Temperaturen der verschiedenen Kollektorschichten während der heißesten Tage der Messperiode dar. Die Temperatur der Innenscheibe liegt etwa 10 °C über der Lufttemperatur im Treppenhaus, das über Öffnungen mit der Außenluft verbunden ist. Eine vergleichbare Temperaturdifferenz zwischen Innenscheibe und Innenraumtemperatur tritt auch bei konventionellen Sonnenschutzverglasungen auf. Daher ist auch die Wärmeabgabe dieser teiltransparenten Kollektoren an den Innenraum ähnlich gering wie die Wärmeabgabe von konventionellen Sonnenschutzverglasungen.

Die Arbeiten wurden von der Europäischen Union (EU) im Rahmen des Projekts »Cost-Effective« gefördert.

www.cost-effective-renewables.eu



1

MODELLBASIERTE MESSDATENANALYSE VON SOLARAKTIVHÄUSERN

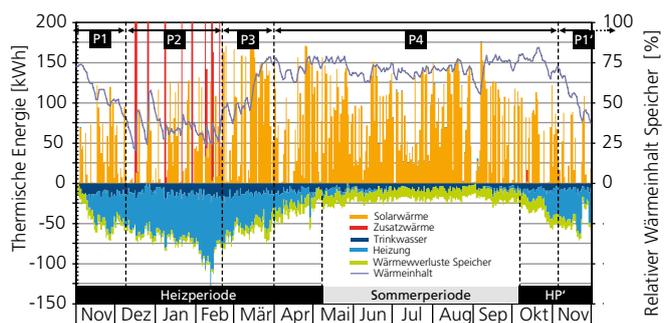
Die Europäische Union (EU) fordert in der Gebäuderichtlinie 2010 ab dem Jahr 2020 Niedrigstenergiegebäude (Nearly Zero-Energy Buildings) als Standard für Neubauten. Alternativ zu einer sehr starken Reduzierung des Gebäudewärmebedarfs können die primärenergetisch ungünstig bewerteten fossilen Energieträger auch durch einen erhöhten Anteil an erneuerbaren Energien ersetzt werden. SolarAktivHäuser sind Niedrigstenergiegebäude, in denen mehr als 50% der zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung erforderlichen Wärme solarthermisch am Gebäude erzeugt wird. Im Projekt »HeizSolar« werden neun, den aktuellen Markt repräsentierende SolarAktivHäuser messtechnisch umfassend untersucht und simulationsgestützt Optimierungspotenziale ermittelt.

Wolfgang Kramer, Axel Oliva, Gerhard Striy-Hipp, Werner Platzer

SolarAktivHäuser zeichnen sich durch eine gute Wärmedämmung, eine große Kollektorfläche und einen großen Wärmespeicher aus. Basis des Konzepts ist die Solarwärmeerzeugung in der Heizperiode. Der Betrieb des Speichers lässt sich in vier Phasen unterteilen (Abb. 2). In der Entladephase P1 zu Beginn der Heizperiode erfolgt die Wärmeversorgung durch die aktuell erzeugte und die gespeicherte Solarwärme. In der Nachheizphase P2 des Kernwinters ist die Nachheizung durch den Zusatzwärmeerzeuger erforderlich. In der Beladephase P3 reicht die aktuelle Solarstrahlung für die Wärmeversorgung und die Beladung des Speichers aus. In Phase P4 ist der Speicher vollständig beladen.

Im Einfamilienhaus können typische solarthermische Deckungsanteile von ca. 60% mit relativ kleinen Speichern von einigen Kubikmetern Wasservolumen realisiert werden, die bezüglich des Heizbedarfs im Kernwinter nur Wochenspeicher

1 SolarAktivHaus mit einer solarthermischen Deckung von 100% in Kappelrodeck.



2 Charakteristische Betriebsphasen eines SolarAktivhauses mit ca. 70% solarthermischer Deckung. Aufgetragen sind die thermischen Wärmeerträge und -verbräuche (linke Achse) und der Wärmehalt des Speichers (rechte Achse).

darstellen. Große solare Deckungsanteile von über 90% erfordern dagegen eine saisonale Speicherung der sommerlich erzeugten Solarwärme bis in den Kernwinter und ein um ca. den Faktor 10 größeres Speichervolumen. Die Optimierung auf Basis von Simulationsrechnungen konzentriert sich auf ein ertrags- und kostenoptimiertes Verhältnis von Gebäudeeffizienz, Kollektorfläche und Speichervolumen, die Identifizierung effizienter Anlagenhydrauliken sowie die Effizienzsteigerung durch optimierte Betriebsführung.

Das Projekt »HeizSolar« wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) sowie dem Projektträger Jülich unterstützt.

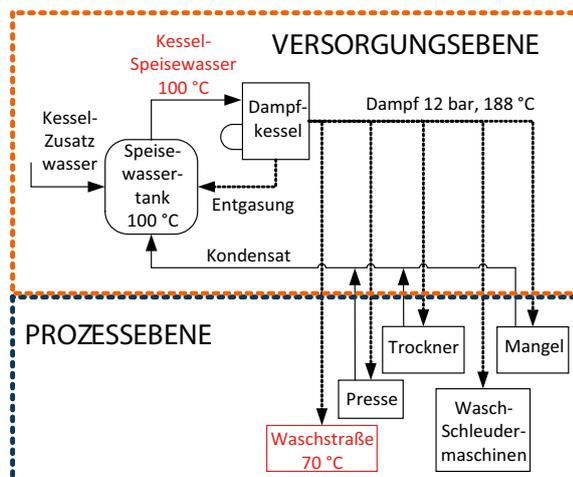
www.DieSolarHeizung.info



INTEGRATION VON SOLARER PROZESSWÄRME IN WÄSCHEREIBETRIEBE

Thermische Solaranlagen können in vielen Industrie- und Gewerbebetrieben einen erheblichen Teil des Wärmebedarfs decken. Im Projekt »SoProW« koordiniert das Fraunhofer ISE ein Konsortium aus Solarthermie-Industrie, Wäschereibranche, Forschungsinstituten und Softwareentwicklern. Ziel ist, ein Branchenkonzept für die optimierte und standardisierte solarthermische Unterstützung von Wäschereien zu erarbeiten. Für dynamische Systemsimulationen nutzen wir das am Fraunhofer ISE entwickelte Programm »ColSim«. Damit haben wir die möglichen Solarerträge verschiedener Einbindungsstellen für solare Prozesswärme bestimmt. Zudem wurde untersucht, wie sich künftige Änderungen der Wärmebedarfe auf die Erträge auswirken würden.

Annabell Helmke, Stefan Hess, Anton Neuhäuser, Werner Platzer



2 Wäscherei mit Dampfnetz und Prozessen. Der vom Kessel erzeugte Dampf versorgt die Verbraucher über Wärmetauscher oder direkt. Die hier beispielhaft untersuchten Integrationsstellen für solare Prozesswärme sind rot markiert.

1 Tunnel-Waschstraße mit mehreren Kammern auf unterschiedlichen Temperaturniveaus.

Wäschereien bieten für Solarwärme eine Vielzahl möglicher Einbindungsstellen. Deren Eignung bewerten wir hinsichtlich Temperatur- und Druckniveau, Wärmeübertragungsmedium und Wärmebedarf. Zusätzlich haben wir exemplarisch für solare Speisewasser-Vorwärmung (Versorgungsebene) und solare Unterstützung einer Waschstraße (Prozessebene) die Auswirkungen geänderter Lastprofile untersucht. Bei gleicher Reduktion des Wärmebedarfs wurden folgende Szenarien untersucht:

- A) Reduktion der Wäschemenge: Betriebszeit der gesamten Prozesskette verkürzt sich, thermischer Leistungsbedarf bleibt gleich.
- B) Wärmerückgewinnung in der Waschstraße: Reduktion des thermischen Leistungsbedarfs für diesen Prozessschritt, Betriebszeit bleibt gleich.

Beim ursprünglichen Wärmebedarf erzielt das Solarsystem aus Vakuumröhren-Kollektoren und Speicher aufgrund der niedrigeren Integrationstemperatur in der Waschstraße einen höheren Ertrag. Bei Variation nach Szenario A) werden ab einer Lastreduktion von 33% bei der Speisewasserintegration höhere Erträge erzielt. Bei Szenario B) ist dies erst ab einer Lastreduktion von 50% der Fall. Dies zeigt, dass zur Bewertung der Zukunftssicherheit prognostizierter Solarerträge neben der möglichen absoluten Änderung des Wärmebedarfs auch die Art der Lastprofiländerung entscheidend sein kann. Die Einbeziehung solcher Aspekte in Systemsimulationen kann die Investitionssicherheit z. B. für Contractoren erheblich erhöhen.

Unsere Arbeiten fließen auch in den IEA-Task 49 »Solar Process Heat for Production and Advanced Applications« ein.

<http://task49.iea-shc.org>



ENTWICKLUNG VON MEMBRAN-DESTILLATIONSMODULEN UND -SYSTEMEN

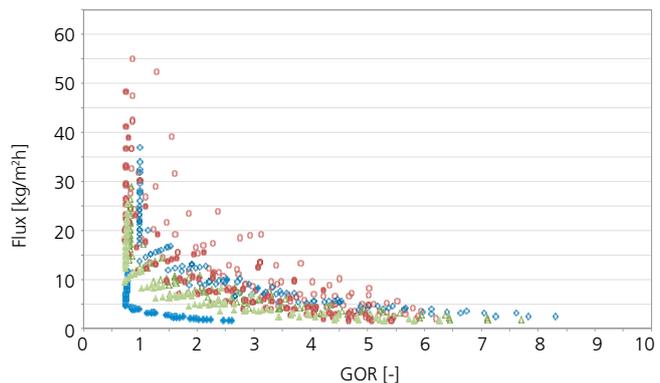
Die Aufbereitung von Meer- und Brackwasser ist in vielen Ländern ein elementarer Bestandteil der Trinkwasserversorgung. Dafür wird die Entwicklung kleinerer, dezentraler Anlagen immer wichtiger. Zudem gewinnen die energieeffiziente und nachhaltige Aufbereitung industrieller Abwässer und die Rückgewinnung von Wertstoffen an Bedeutung. Hierzu sind innovative, auf individuelle Bedingungen abgestimmte Aufbereitungsverfahren notwendig. Am Fraunhofer ISE werden umfangreiche Arbeiten zur Membrandestillation (MD) durchgeführt. Ein neu entwickeltes und an zahlreichen Messungen validiertes Simulationsmodell ermöglicht die Betrachtung des gekoppelten Wärme- und Stofftransports von der Membran über das Modul bis hin zur Systemebene.

David Düver, Florian Groß, **Joachim Koschikowski**,
Christiane Pohlisch, Martin Rolletschek, Rebecca Schwantes,
Daniel Winter, Werner Platzer

Die Membrandestillation (MD) ist ein thermisches Separationsverfahren, bei dem die Selektion zwischen einer flüssigen und dampfförmigen Phase über eine hydrophobe, mikroporöse Membran erfolgt. Die flüssige Sole wird von der Membran zurückgehalten. Als Triebkraft für die Trennung dient eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Fluiden an den Grenzflächen der Membran. Das Verfahren kann sowohl zur Meerwasserentsalzung als auch zur Aufbereitung verschiedener Abwässer oder Prozessflüssigkeiten eingesetzt werden.

Die idealen Modul- und Membranspezifikationen können je nach Anwendung und Zielsetzung sehr unterschiedlich gestaltet sein. Wir entwickeln mit Industriepartnern Module, Systeme und Modulkomponenten. Dazu wird neben experimentellen Arbeiten im Labor und an Pilotanlagen im Feld ein neu entwickeltes, sehr detailliertes physikalisches

1 A/B Pilotanlage auf Gran Canaria zur solarthermischen Meerwasserentsalzung auf Basis von Membrandestillation.



2 Simulationsergebnisse für verschiedenste MD-Modulkonfigurationen, die die gegenläufigen Optimierungsrichtungen von Energieeffizienz – ausgedrückt durch den Grad der Wärmerückgewinnung (GOR) – und flächenspezifischer Produktivität – ausgedrückt durch den Flux – erkennen lassen. Die Simulation ermöglicht die Ermittlung eines anwendungsorientierten Optimums.

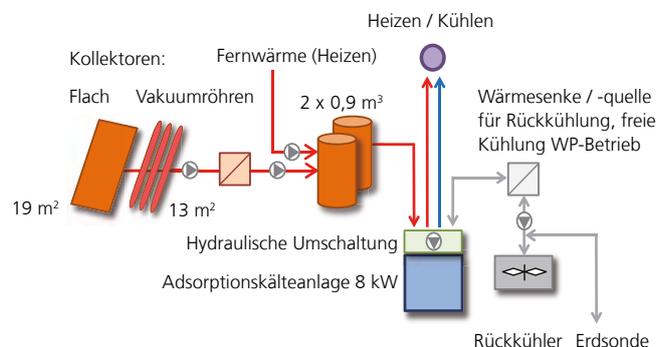
Simulationsmodell eingesetzt, mit dem Sensitivitätsanalysen, Parameterstudien oder entsprechende Modul- und Systemauslegungen durchgeführt werden. So wurde z. B. für Salzwasser unterschiedlichster Konzentration untersucht, welche Auswirkungen die Änderung der Membranparameter auf den Gesamtprozess haben, um eine gezielte Membranoptimierung vornehmen zu können. Zur Moduloptimierung wurde, wie in Abb. 2 dargestellt, mittels der Simulationsrechnungen festgestellt, welche Modulkonfiguration mit welchen geometrischen Eigenschaften für die Entsalzung von Meerwasser mit 35 g Salz / Liter Wasser bei einer Antriebstemperatur von 80 °C die energieeffizienteste oder die ertragsstärkste Variante ergibt.



SYSTEMENTWICKLUNG UND BETRIEBSANALYSE SOLARE KÜHLUNG

Der Einsatz von Solarenergie zur Kühlung und Klimatisierung wird am Fraunhofer ISE seit nahezu 20 Jahren vorangetrieben. Die Aktivitäten umfassen FuE- und Demonstrationsvorhaben im Material- und Komponentenbereich, Systemmodellierung und -simulation zur planungsunterstützenden Konzeptfindung sowie Monitoring und Betriebsanalyse. Ein Hauptanliegen im Projekt »SolCoolSys« unter Federführung des Fraunhofer ISE ist, in Feldtests eine standardisierte Systementwicklung für solare Kühlung im kleinen Leistungsbereich zu erproben. Ziele sind eine geringere Fehleranfälligkeit in Installation und Betrieb sowie eine erweiterte Nutzung von Adsorptionskälteanlage und Rückkühlwerk durch Wärmepumpenbetrieb und freie Kühlung.

Florian Mehling, Peter Schossig, **Edo Wiemken**, Hans-Martin Henning



2 Schemabild der solaren Kühlung an der Gewerbeschule. Zu Ausbildungszwecken verfügt die Anlage über zwei unterschiedliche Kollektorfelder. Ein zusätzlicher Fernwärmeanschluss stellt die Raumheizung im Winter sicher. Die Kälte- und die Wärmeverteilung erfolgen über zwei Decken-Umluftkühler sowie über eine Fußbodenheizung.

1 Anlageninstallation zur solaren Kühlung und zur Heizungsunterstützung an der Richard-Fehrenbach Gewerbeschule in Freiburg; rechts die Adsorptionskälteanlage mit 8 kW Nennkälteleistung.

In »SolCoolSys« sind Adsorptionskälteanlagen der Sortech AG und Flachkollektoren der Solvis GmbH eingesetzt. Beide Hersteller sind auch als Partner in das Projekt eingebunden. Es wurden sechs Anlagen im Nennkälteleistungsbereich zwischen 8 und 15 kW im Endkundenbetrieb installiert. Die Umschaltungen auf die Betriebsarten solare Kühlung, freie Kühlung über das Rückkühlwerk und auf den Wärmepumpenbetrieb werden in einer speziell entwickelten Hydraulikgruppe vorgenommen. In der Standard-Variante wird ein Hybridkühler mit überwiegend trockener Rückkühlung eingesetzt.

In allen Anlagen wurde ein Monitoring-System und eine Internet-basierte Messdatendarstellung aufgebaut. Die automatisierte Analyse der Messdaten war Voraussetzung für die Systemoptimierung und die Fehlererkennung im Betrieb. Die letzte Anlage wurde im Sommer 2013 in Freiburg in Betrieb genommen (Abb. 1 und 2). Die Datenauswertungen bestätigen einen guten Betrieb mit thermischen Arbeitszahlen der Kälteanlage im erwarteten Bereich; das Maximum der Häufigkeit liegt zwischen 0,4 bis 0,55.

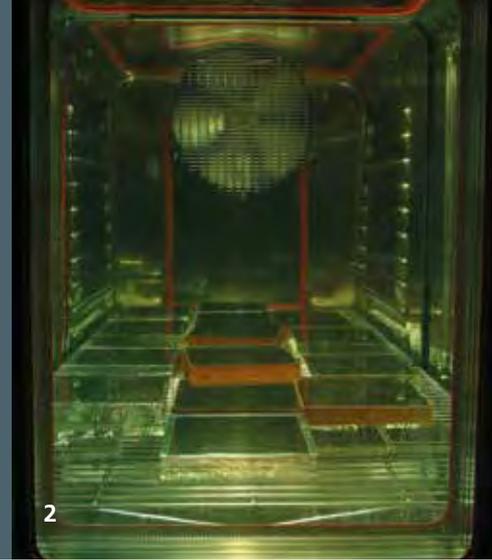
Die Projekterfahrungen zeigten in einigen Fällen, dass – unabhängig vom Grad der hydraulischen Vereinfachung – unzureichende Dimensionierung der Kälte- und Wärmeverteilung auf der Betreiberseite zu Fehlanpassungen im Betrieb der Anlage führen. Für eine optimale Nutzung der solaren Kühlung ist daher eine sorgfältige Auslegung des Lastkreislaufs unabdingbar.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.

www.solcoolsys.de



1



2

KONZENTRATOROPTIK: VOM DESIGN ZUM PRODUKT

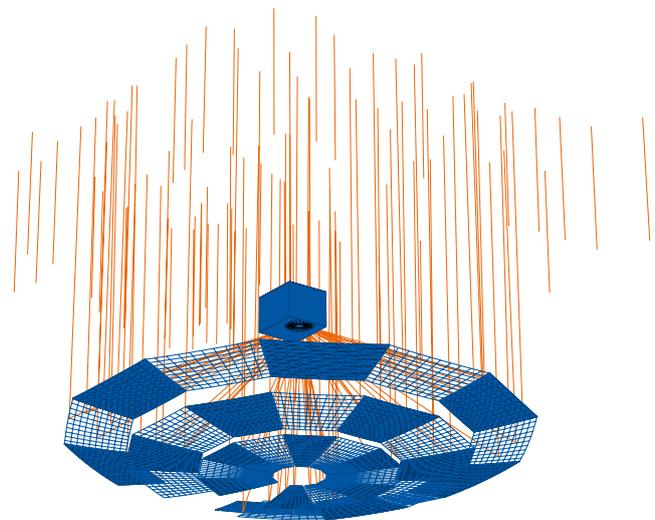
Ein großer Investitionskostenanteil bei der konzentrierenden Solarthermie entfällt auf die Reflektoren. Zur Kostensenkung können Kompositflächenelemente als Reflektoren beitragen, wie sie z. B. in der Fahrzeugindustrie eingesetzt werden. Diese zeichnen sich durch eine hohe, selbsttragende innere Steifigkeit bei geringem Eigengewicht aus. Auch gekrümmte Oberflächen können industriell in großen Elementen gefertigt werden. Eine besondere Herausforderung stellt derzeit noch die Herstellung von in zwei Richtungen stark gekrümmten Elementen dar, beispielsweise für Dish-Stirling-Systeme. In einem Industrieprojekt unterstützen wir einen Hersteller von Komposit-Reflektoren bei der Entwicklung von Dish-Prototypen mit Designoptimierung und Qualitätsprüfungen.

Gregor Bern, Anna Heimsath, Peter Nitz, Werner Platzler

Bei der Entwicklung einer neuartigen Fertigung für Konzentratoren aus Kompositelementen unterstützen wir unseren Industriepartner mit Optimierung, experimenteller Charakterisierung und Beratung. Auf die gekrümmte, selbsttragende Schichtstruktur mit hoher innerer Steifigkeit werden Dünnglasspiegel aufgeklebt. Der Herstellungsprozess ermöglicht große zusammenhängende Flächenelemente bei gleichzeitig leichter und formfester Struktur.

Dish-Stirling-Systeme kombinieren einen als »Parabolschüssel« geformten Konzentrator und einen Stirlingmotor zur Stromerzeugung. Die Dishes haben einen hohen Konzentrationsfaktor und ein großes Wirkungsgradpotenzial, erfordern aber hohe Präzision und ein optimiertes Zusammenspiel der Komponenten. Mit unserem Simulationswerkzeug »Raytrace3D« untersuchen wir Konzentratorgeometrien und optimieren sie mittels Strahlverfolgung unter Vorgabe von Produktionsparametern. Ein neuartiges Design ermöglicht, optische Verluste, die

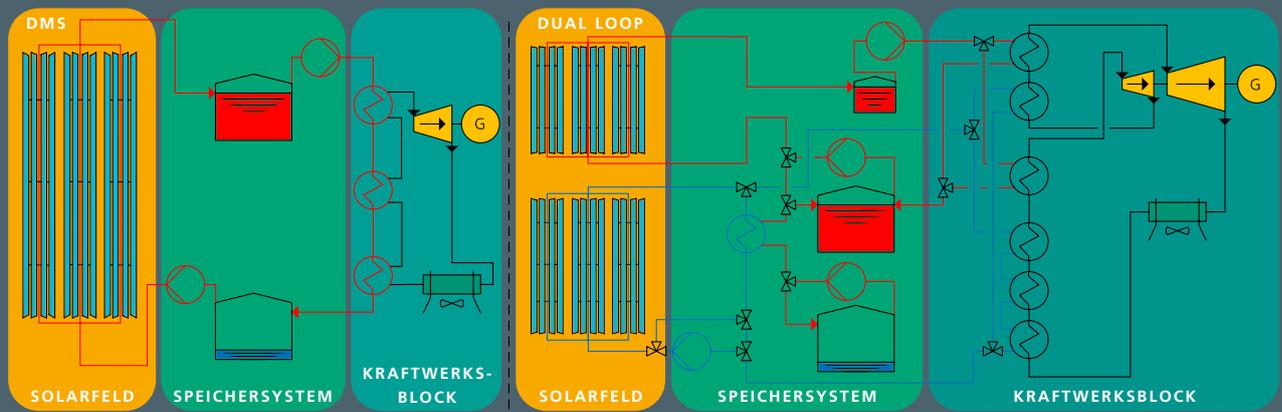
- 1 Im Deflektometrie-Labor prüfen wir flächig hochaufgelöst die Formtreue von kleinen und auch großen Reflektor-Prototypen.
- 2 Unterschiedliche Muster von Komposit-Reflektoren prüfen wir in Klimakammern auf Haltbarkeit und thermische Verformung.



- 3 Optimierter und mit Strahlverfolgung simulierter Dish-Konzentrator für Dish-Stirling-Systeme.

durch Fertigungstoleranzen und Positionierungsgenauigkeiten entstehen, stark zu reduzieren (Abb. 3).

Zur Qualitäts- und Produktprüfung führen wir Klimakammer-tests (Abb. 2) zur Untersuchung der Stabilität der Kompositverbindungen durch. Die Formtreue von Prototypen untersuchen wir mittels Deflektometrie (Abb. 1). Mit diesem Messsystem wird die Ablenkung von Sichtstrahlen nach Reflektion an der Facette ermittelt. So identifizieren wir hoch aufgelöst lokale Abweichungen von der Soll-Form, die Rückschlüsse auf Verbesserungspotenziale in der Produktion erlauben.

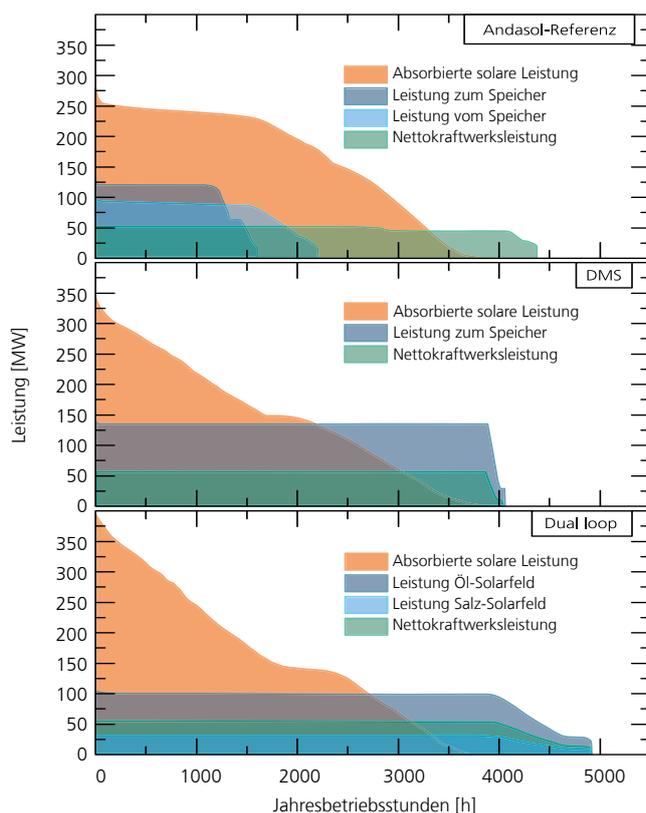


1

SPEICHERTECHNOLOGIEN FÜR LINEAR-FRESNEL-KRAFTWERKE

Im Unterschied zu PV-Kraftwerken können solarthermische Kraftwerke durch Integration von Wärmespeichern auch zu Zeiten mit geringer oder fehlender Solarstrahlung bedarfsgerecht Strom liefern. Für unterschiedliche Kollektortypen bieten sich unterschiedliche Speicherlösungen an. Für Linear-Fresnel-Kollektoren haben wir verschiedene Speichertechnologien und Kraftwerkskonzepte untersucht und auf Basis von Stromgestehungskosten mit einem dem Stand der Technik entsprechenden Referenzkraftwerk (Parabolrinnen-Kraftwerk mit indirektem Speichersystem) verglichen.

Tom Fluri, **Alexander Vogel**, Werner Platzer



1 Schema eines Direktsalzsammel-Kraftwerks (links) und eines Dual-Loop-Kraftwerks (rechts).

Hier werden ein Direktsalzsammel-Kraftwerk (DMS – Direct Molten Salt) mit direktem Zweitankspeicher und ein Dual-Loop-Kraftwerk – bestehend aus einer Kombination von Thermoöl- und Salzsammel-Solarfeld mit indirekt-direktem Speichersystem – mit dem Referenzsystem verglichen (Abb. 1). Das Referenzdesign basiert auf dem Design, das bei den Andasol-Kraftwerken in Guadix, Spanien, zur Anwendung kommt. Für jedes Kraftwerksdesign wird in Jahresertragsrechnungen die optimale Loop-Anzahl für die niedrigsten Stromgestehungskosten ermittelt. Demzufolge variiert der jährliche Nettostromertrag von Fall zu Fall. Allen Kraftwerken ist ein $1000 \text{ MWh}_{\text{th}}$ Salzsammel-Speicher und ein $50 \text{ MW}_{\text{el}}$ Kraftwerksblock gemeinsam. Bei den Simulationen wird die Fraunhofer Software »ColSim-CSP« eingesetzt.

Abb. 2 stellt die Leistung gegenüber den Jahresbetriebsstunden des Referenz-, DMS- und Dual-Loop-Kraftwerks am Standort Daggett, USA, dar. Die niedrigsten Stromgestehungskosten werden unter den getroffenen Kostenannahmen mit dem Dual-Loop-Konzept erzielt. Das Direktsalzsammel-Konzept erzielt ebenfalls niedrige Stromgestehungskosten, ist weniger komplex und am besten geeignet, flexible Kraftwerksleistung bereit zu stellen. Wenn die Kosten von Solarfeld und Wärmetransportersystem um etwa 15% reduziert werden können, könnte das Direktsalzsammel-Konzept die beste Option sein.

Das Projekt »Supergrid« wird im Programm »Märkte von Übermorgen« der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert.

2 Leistung gegenüber den Jahresbetriebsstunden des Referenz-, DMS- und Dual-Loop-Kraftwerks am Standort Daggett; Plateau bei 150 MW: Es steht mehr solare Leistung zur Verfügung als bei einer fixen Speichergröße von $1000 \text{ MWh}_{\text{th}}$ eingespeichert werden kann.



TECHNOLOGIEMIXOPTIMIERUNG FÜR SOLAR- UND WINDPARK IN KUWAIT

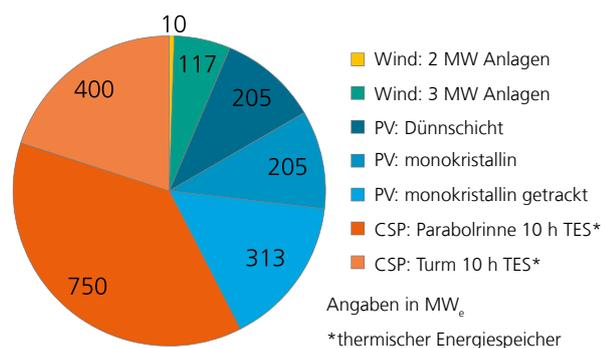
In Kuwait soll auf einer Fläche von 100 km² in drei Ausbaustufen ein Park aus Wind-, CSP- und PV-Technologien mit einer Gesamtkapazität von 2 GW gebaut werden. Insgesamt 14 potenzielle Technologien wurden im Rahmen dieser Studie ausgewählt und techno-ökonomisch bewertet. Um für verschiedene Szenarien die optimale Technologiezusammensetzung zu erhalten, haben wir Bewertungskriterien definiert und ein Optimierungsverfahren entwickelt. Ein wichtiges Ziel ist dabei, die in Kuwait ausgeprägten Lastspitzen mit dem Park abzudecken. Die Optimierung berücksichtigt neben technischen auch sozio-ökonomische Faktoren sowie eine prognostizierte Kostenentwicklung bis zur letzten Ausbaustufe 2030.

Thomas Fluri, Verena Jülch, **Simon Lude**, Werner Platzer

Zu Beginn der Studie wurde ein Technologiescreening durchgeführt, um potenziell infrage kommende Solar- und Windtechnologietypen zu identifizieren. Das Resultat war eine Auswahl von 14 unterschiedlichen Technologieoptionen (3x Wind, 5x PV, 6x CSP). Für diese Varianten wurden Zeitreihen für den Energieertrag über ein Jahr mit geeigneten Simulationstools erstellt, Kostenmodelle aufgestellt und weitere Kennzahlen, wie Wasserverbrauch und Schaffung von Arbeitsplätzen im Land, ermittelt.

In einer Nutzwertanalyse wurden die Technologiemix-Optionen anhand von sieben Kriterien bewertet. Durch eine unterschiedliche Gewichtung der einzelnen Kriterien war es möglich, die quantitative Zusammensetzung der Technologien im Park auf ein primäres Schwerpunktziel hin zu optimieren. Drei unterschiedliche Szenarien mit den Schwerpunkten Energieerzeugung zu Lastspitzen, hoher Jahresgesamt-

1 Modell des 2 GW Solar-/Wind-Parks Shagaya in Kuwait.



2 Anteile verschiedener erneuerbarer Energietechnologien im Kraftwerkspark Shagaya basierend auf den durchgeführten Optimierungsrechnungen. Hauptschwerpunkt liegt bei diesem Mix auf der Energieerzeugung zu Spitzenlastzeiten.

Energieertrag und niedrige Stromgestehungskosten wurden analysiert. Für die Last- und Wetterdaten wurde das Jahr 2010 als Referenzjahr definiert.

Als Randbedingungen für die Optimierung wurden neben der verfügbaren Fläche und der Zielkapazität von 2 GW ein mindestens zu erreichender Capacity Credit – das Verhältnis von neu installierter erneuerbarer zu der dadurch ersetzbaren konventionellen Kapazität – herangezogen. Basierend auf den Optimierungsergebnissen wurden die Technologieanteile in Abstimmung mit dem Kuwait Institute for Scientific Research auf 127 MW Windenergie, 723 MW Photovoltaik und 1150 MW konzentrierende Solarkraftwerke mit thermischen Speichern festgelegt (Abb. 2).



POLYMERANALYTIK FÜR DIE SOLARTHERMIE DER ZUKUNFT

Steigende Rohstoffpreise, aufwendige Produktionsverfahren und ein wachsender Bedarf an kostengünstigen »Plug and Play«-Systemen stellen die Solarthermiebranche vor große Herausforderungen. Gefragt sind neue Designs und Herstellungsprozesse, die beispielsweise durch den Einsatz optimierter Kunststoffe ermöglicht werden. Polymere eröffnen ein großes Kostensenkungspotenzial und durch erweiterte Freiheitsgrade im Design auch die Chance, Solarthermie »neu« zu denken. Die Qualifizierung der neuen Materialien erfolgt am Fraunhofer ISE in der Gruppe Gebrauchsdaueranalyse, die angepasste Prüfungen und Charakterisierungsmethoden für Polymere entwickelt und anhand realer Belastungsdaten validiert.

Steffen Frick, Michael Köhl, Andreas Piekarczyk, Sandrin Saile, **Karl-Anders Weiß**, Regine Weiß, Harry Wirth

Kunststoffe sind leicht, flexibel formbar und geeignet für effiziente Massenproduktion. Um diese Eigenschaften für die Solarthermie nutzbar zu machen, ist es notwendig, Polymere auf ihre Eignung für die Anwendung in solarthermischen Systemen zu prüfen. Je nach Komponente müssen die Materialien für hohe Betriebstemperaturen und -drücke und / oder UV-Strahlung gerüstet sein. Das Fraunhofer ISE entwickelt angepasste Prüfsequenzen und beschleunigte Alterungsprüfungen für die Optimierung neuer Materialien. Im Rahmen der Projekte »SCOOP« und »ExKoll« sowie der »IEA SHC Task 39«, einer internationalen Plattform für die Arbeit an polymerbasierten solarthermischen Systemen, arbeitet die Gruppe Gebrauchsdaueranalyse aktiv an der Entwicklung neuer Materialien und Designs für kostengünstige und effiziente Kunststoffkollektoren mit.

Für die Untersuchung der Materialien kommt ein kombinierter Ansatz aus zerstörungsfreien optischen (ATR-IR, FT-IR, Raman Spektroskopie), oberflächensensitiven (AFM) und mechanischen Verfahren zum Einsatz. Untersucht werden Materialprüflinge, die zuvor in Klimaschränken unter dem Einfluss von hoher Temperatur in Verbindung mit UV-Strahlung und ggf. Feuchte gealtert wurden. Für die Bestimmung der Alterungsparameter kann das Institut auf umfangreiche Belastungsdaten von eigenen Outdoor-Testständen u. a. in Freiburg (gemäßigtes Klima), auf Gran Canaria (maritim) (Abb. 1) und in der Negev Wüste (arid) zurückgreifen. Die ermittelten Daten können auch zur Materialoptimierung für die unterschiedlichen Einsatzgebiete von solarthermischen Kollektoren herangezogen werden.

Zusätzlich werden die Materialien auch in Bezug auf die anvisierte Verarbeitungstechnik geprüft. Innerhalb des euro-



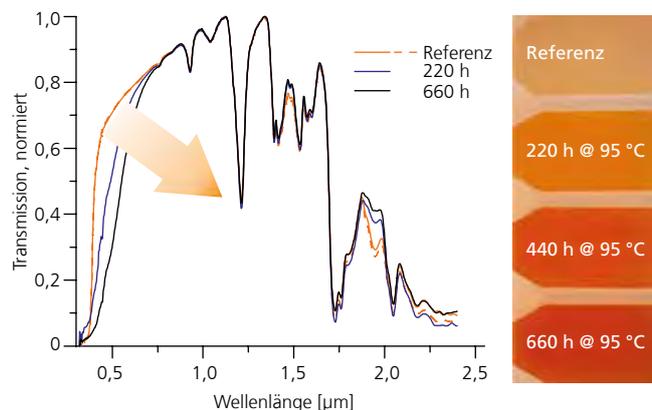
päischen Projekts »SCOOP« werden die Fertigungstechniken Extrusion und Spritzguss verfolgt. Während in aktuellen Arbeiten Materialprüfungen anhand von Standard-Zugprüfungen erfolgen, werden weitere produktnähere Prüfungen entwickelt, z. B. Indentations-Tests für extrudierte Doppelstegplatten. In Korrelation mit spektroskopischen Daten lassen sich aus den mechanischen Veränderungen Rückschlüsse auf Vorgänge auf Molekularebene ziehen (Abb. 3).

Die Ergebnisse fließen direkt in die Design-Entwicklung ein. Jüngstes Ergebnis dieser Arbeiten ist ein Thermosiphonsystemkonzept mit einem Kollektor auf Basis von Polypropylen. Der Prototyp verfügt über eine Kollektorfläche von 1,2 m² und eine Speicherkapazität von 65 l und wurde bei der Task 39 Ausstellung im September vorgestellt. Der Kollektor ist durch Extrusion kostengünstig zu produzieren und als vielversprechendes Produkt für den Export in sonnenreiche Gegenden, wie z. B. die MENA-Region, zu sehen.

Das hohe Potenzial dieser Region wurde anhand einer Marktanalyse im Projekt »ExKoll« deutlich. Ziel der Studie war es, Länder zu identifizieren, die grundsätzlich ein hohes Potenzial für Kollektoren aus Kunststoffen bieten. Um die Relevanz der Ergebnisse abzusichern, wird derzeit eine Wirtschaftlichkeitsanalyse für verschiedene Kollektorkonzepte durchgeführt. Diese werden mithilfe einer Ökobilanz (Lebenszyklusanalyse) untereinander verglichen und etablierten Kollektorkonzepten gegenübergestellt.

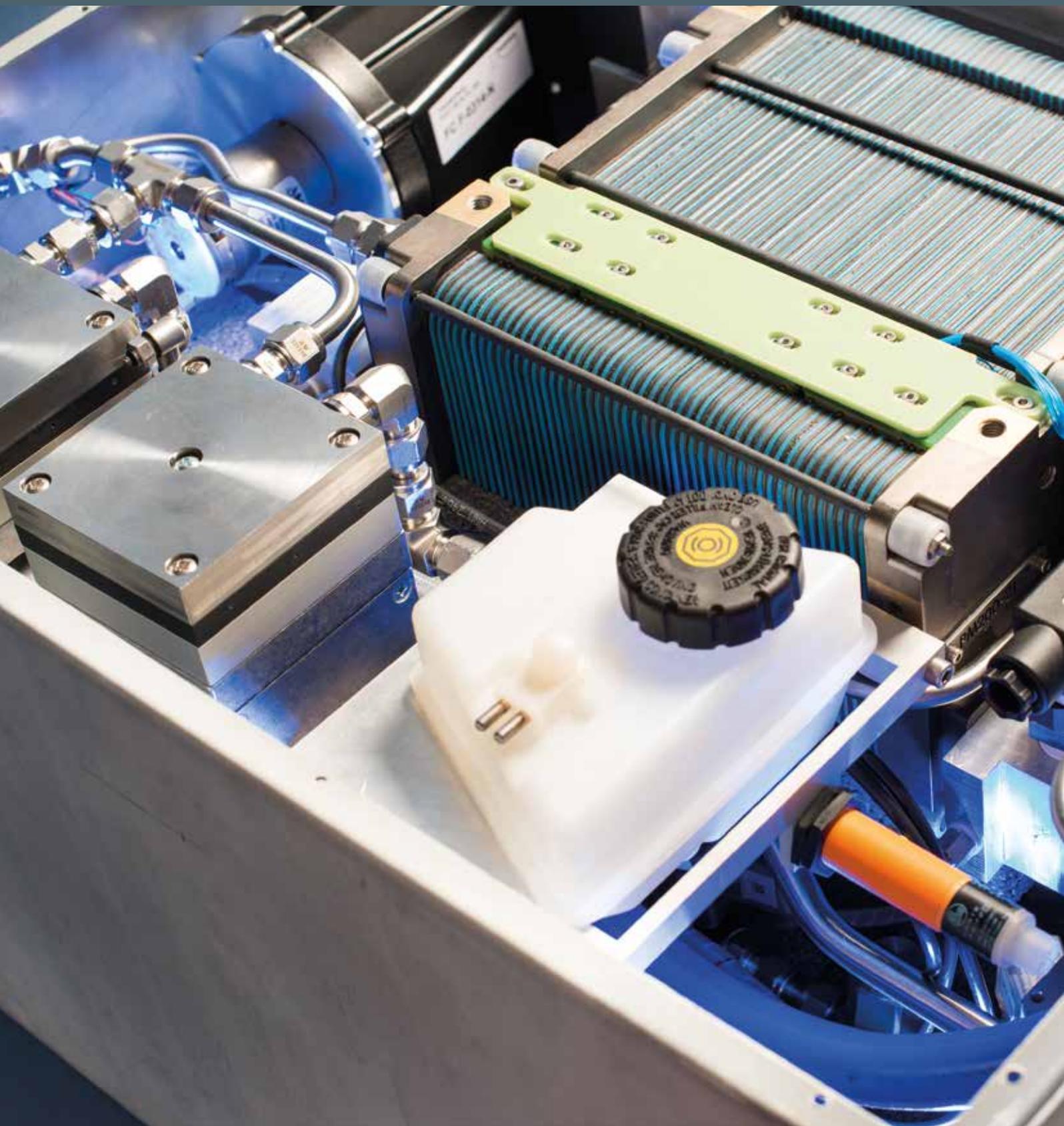
Das Projekt »ExKoll« sowie die Mitarbeit in der »IEA SHC Task 39« werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt. »SCOOP« wird im 7. Rahmenprogramm der Europäischen Union (EU) gefördert.

- 1 *Exponierter Polymerkollektor am maritimen Freibewitterungsteststand in Pozo Izquierdo, Gran Canaria.*
- 2 *Wissenschaftler des Fraunhofer ISE untersuchen die Eignung von Kunststoffen für den Einsatz in solarthermischen Systemen.*
- 3 *Indentations-Test an einer extrudierten Doppelstegplatte.*
- 4 *Standard-Zugprüfungen nach ISO 527.*
- 5 *Prototyp eines Thermosiphonsystems aus Polymermaterialien auf der Task 39 Ausstellung, Freiburg, Deutschland (Design: SCOOP, Konstruktion: Fraunhofer ISE).*



- 6 *Optische Charakterisierung der Verfärbung von Polyamid-Prüfknochen durch Chromophorbildung im Verlauf der Alterung bei 95 °C.*

WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFF- ZELLENTechnologie



Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist gekennzeichnet durch einen zunehmenden Anteil fluktuierender Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie. Dadurch entstehen neue Herausforderungen bei der Anpassung von Stromangebot und -nachfrage im Netz. Wasserstoff, der über die Wasserelektrolyse mittels Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt werden kann, besitzt als einziger Energieträger das Potenzial, sehr große Energiemengen auch über lange Zeiträume in chemischer Form zu speichern. Neben der Rückverstromung in stationären Brennstoffzellensystemen oder in Gasmotoren bildet Wasserstoff auch als Kraftstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen das Bindeglied zur emissionsfreien Mobilität. Wasserelektrolyseure sind künftig als dezentrale, regelbare Lasten im Stromnetz für die Stadtwerke oder Netzbetreiber eine wertvolle Regelgröße, um die Stromerzeugung zeitnah dem Verbrauch anzupassen und damit die Netzfrequenz zu stabilisieren.

Im Geschäftsfeld Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie bieten wir Forschungsdienstleistungen zur Erzeugung, Wandlung und Speicherung von Wasserstoff an:

Der Schwerpunkt der elektrochemischen Wasserstoffherzeugung liegt auf natur- und ingenieurwissenschaftlichen Fragestellungen der Wasserspaltung in Polymerelektrolyt-Membran-Elektrolyseuren mittels Elektrizität. Wir betreiben multiphysikalische Simulationen und elektrochemische Charakterisierung von Zellen und Stacks. Weiterhin konstruieren wir produktnahe Funktionsmuster vom Zellstapel bis hin zu vollautomatisierten Gesamtsystemen bis 50 bar Druckbetrieb. Dafür stehen uns im Endausbau Teststände für Zellstapel bis 1 MW_{el} Leistungsaufnahme zur Verfügung. Zudem erarbeiten wir Studien zur Technologie der Wasserelektrolyse und zur Anwendung von Wasserstoff im Kontext der solaren Energiewirtschaft.

Brennstoffzellen wandeln mit hoher Effizienz Wasserstoff in Strom und Wärme. Wir entwickeln Brennstoffzellensysteme für reale Außenbedingungen, insbesondere für die Antriebstechnik, aber auch für dezentrale stationäre Systeme wie Notstromaggregate sowie für portable elektronische Geräte. Unsere Forschung umfasst den Aufbau sowie die Simulation bzw. Charakterisierung von Einzelzellen, Zellstapeln und Systemen, ebenso wie das Testen von Peripherie- und Zellkomponenten unter extremen Klimabedingungen und in Bezug auf ihre elektrochemische Beständigkeit.

Wir besitzen langjährige verfahrens- und prozesstechnische Erfahrung mit der thermochemischen Wasserstoffherzeugung fossiler und biogener Energieträger. Zu diesen Verfahren

zählen die Reformierung und die Pyrolyse. Darüber hinaus haben wir unsere Arbeiten auf nicht-energetische (stoffliche) Anwendungen biogener Energieträger erweitert. Wir entwickeln Verfahren, um aus Wasserstoff und Kohlendioxid flüssige Energieträger oder auch chemische Bausteine zu synthetisieren, die bislang aus Erdöl hergestellt werden. Im Rahmen von experimentellen Untersuchungen oder Studien prüfen wir die technologische Machbarkeit von neuen, energieeffizienten und ressourcenschonenden Verfahren.

Mit unserem Forschungsangebot im Bereich der elektrochemischen Wandlertechnologien sowie verfahrenstechnischer Prozesse ermöglichen wir den Übergang von der Verwendung fossiler Energieträger hin zu einer nachhaltigen und CO₂-freien Energiewirtschaft.

Unsere Forschung umfasst:

- Stack-Entwicklung für PEM-Brennstoffzellen und -Elektrolyseure
- Multiphysikalische Modellierung von Komponenten, Zellen, Stacks und kompletten Systemen
- Elektrochemische Charakterisierung von Zellen, Zellstapeln und Systemen
- Machbarkeitsuntersuchungen neuer verfahrenstechnischer Prozesse mit Schwerpunkt auf heterogen katalysierten chemischen Umwandlungen
- Mess-, Steuerungs- und Regelungstechnik (MSR) für Laboranlagen, Prototypenanlagen und Funktionsmuster
- Produktionstechnik
- Technologie-, Konzept- und Nutzerakzeptanzstudien





Wasserstoff-Brennstoffzellensystem zur jahreszeitlichen Energiespeicherung mit einer Ausgangsleistung von 1,5 kW.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Christopher Hebling

Telefon +49 761 4588-5195
h2fc.hydrogen@ise.fraunhofer.de

Wasserstoffherzeugung durch Wasserelektrolyse

Dr. Tom Smolinka

Telefon +49 761 4588-5212
h2fc.electrolysis@ise.fraunhofer.de

Thermochemische Verfahren zur Wasserstoffherzeugung

Dr. Thomas Aicher

Telefon +49 761 4588-5194
h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de

Brennstoffzellensysteme

Dipl.-Ing. Ulf Groos

Telefon +49 761 4588-5202
h2fc.systems@ise.fraunhofer.de

Stoffliche Biomassennutzung

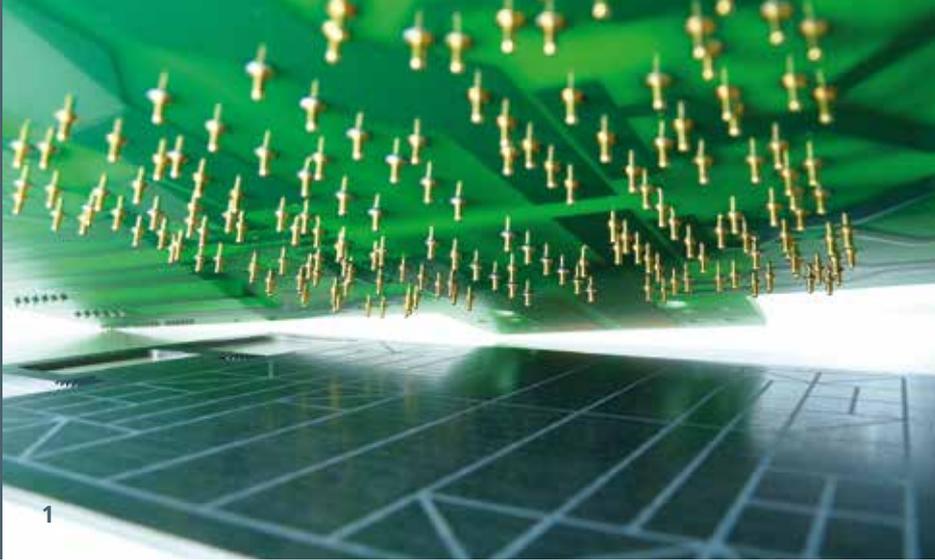
Dr. Thomas Aicher

Telefon +49 761 4588-5194
h2fc.biomass@ise.fraunhofer.de

Power-to-Liquid

Dr.-Ing. Achim Schaadt

Telefon +49 761 4588-5428
h2fc.powertoliquid@ise.fraunhofer.de



ORTSAUFGEÖSTE CHARAKTERISIERUNG AUTOMOBILER BRENNSTOFFZELLEN

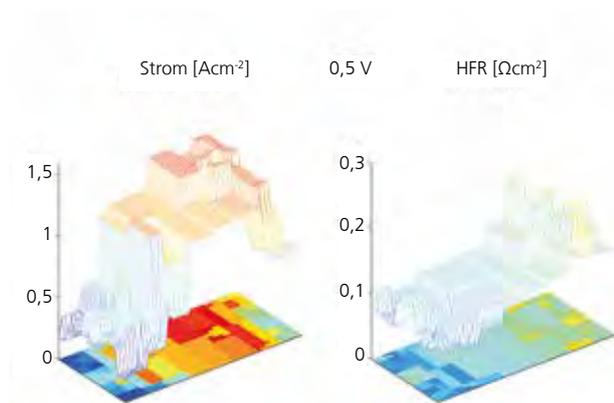
Nachdem die Brennstoffzellen-Technologie ihr Potenzial durch zahlreiche Testfahrzeuge vieler internationaler Automobilkonzerne im jahrelangen Einsatz bewiesen hat, ist die Kommerzialisierung in Serienfahrzeugen bis 2020 geplant. Um die Kostenziele zu erreichen, müssen jedoch noch einige technologische Durchbrüche realisiert werden. Hierzu ist ein detailliertes Verständnis der stark gekoppelten elektrochemischen und thermodynamischen Prozesse in einer Brennstoffzelle erforderlich. Im Forschungsvorhaben »GECKO« bringen fünf führende Institutionen ihre Expertise ein, um die komplexen Vorgänge – wie Zweiphasentransport oder Degradationsprozesse – zu untersuchen.

Robert Alink, **Dietmar Gerteisen**, Ulf Groos, Thomas Jungmann, Janina Löffler, Sebastian Prass, Nada Zamel, Christopher Hebling

Das Fraunhofer ISE analysiert mit Hilfe segmentierter Brennstoffzellen und eines einzigartigen Mehrkanalcharakterisierungssystems auftretende Inhomogenitäten in der Zellebene sowohl im stationären als auch im dynamischen Betrieb. Daraus werden Optimierungspotenziale für Design, Materialauswahl und Betriebsstrategie abgeleitet.

Automobile Einzelzellen haben Zellflächen bis zu 400 cm². Bei Stromdichten bis zu 3 A/cm² ist über die Zellfläche eine erhebliche Abreicherung der Reaktionsgase bei gleichzeitig zunehmender Feuchte die Folge. Daraus können Inhomogenitäten resultieren, die die Leistung oder Degradation in großem Maß beeinflussen können. Um den Betriebszustand der Zelle bis zu einem Gesamtstrom von 780 A lokal zu charakterisieren, verfügen wir über eine Anlage mit 68 synchron arbeitenden Potentiostaten. Sie ermöglicht uns, ortsaufgelöst sowohl die Stromproduktion als auch die elektrochemische Impedanz bei unterschiedlichen Frequenzen zu messen.

1 Auf Leiterplattentechnologie basierte Stromabnehmerplatte kontaktiert mittels Federkontaktstiften eine segmentierte graphitische Gasverteilerplatte.



2 Links: Die Stromdichteverteilung einer 200 cm² großen Zelle zeigt bei einer Zellspannung von 0,5 V und einer Stöchiometrie von 2,2/2,3 (H₂ / Luft) sowohl im Gaseinlass- als auch im Gasauslassbereich eine geringe Stromproduktion. Rechts: Der lokal gemessene Hochfrequenzwiderstand detektiert eine Membrandehydrierung und somit erhöhte ohmsche Verluste im Gaseinlassbereich.

Die ortsaufgelöste Charakterisierung in Kombination mit Modellierungsarbeiten auf Zellebene ermöglicht uns, die komplexe Interaktion der Prozesse basierend auf Inhomogenitäten zu entschlüsseln. So können wir die Verlustmechanismen bezüglich deren Zeitkonstanten separieren. Die daraus entstehenden Erkenntnisse auf der Zellebene werden im Projekt »GECKO« auf die Stack-Ebene transferiert und mit zeitgleich gemessenen Einzelzellimpedanzspektren am Stack korreliert.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.

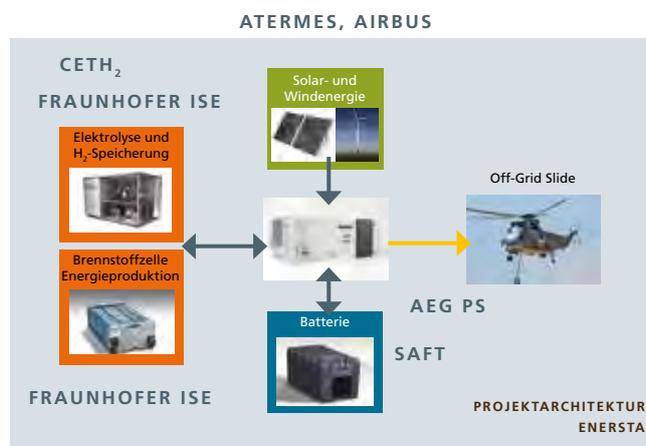
www.gecko-fuelcell.com



AUTONOMES BRENNSTOFFZELLENSYSTEM FÜR DIE TELEKOMMUNIKATION

Im Rahmen des Verbundprojekts »Enersta« wird eine modulare, autonome Energieversorgung im Leistungsbereich von 1 bis 5 kW entwickelt. Standortabhängig kann diese unterschiedliche Stromerzeuger (Solar- oder Windgenerator, Brennstoffzelle) mit Speichersystemen (Batterie, Wasserstofferzeugung und -speicherung) und dem elektrischen Verbraucher verbinden, wobei alle Komponenten in unterschiedlichen Leistungen oder Kapazitäten eingesetzt werden können. Als zentraler Bestandteil wird ein Wasserstoff-Brennstoffzellensystem aufgebaut, das zur jahreszeitlichen Energiespeicherung dient. Unser Ziel ist, ein energieoptimiertes Brennstoffzellensystem zu entwickeln, das in einem Klimabereich von deutlich unter 0 °C bis über 40 °C eingesetzt werden kann.

Gerrit Ammon, Ulf Groos, Stefan Keller, **Wolfgang Koch**, Christopher Hebling



2 Zuständigkeiten der einzelnen Enersta-Projektpartner: AEG ist verantwortlich für die Gesamtsteuerung, Saft für den Energiespeicher, CETH₂ für Elektrolyse und H₂-Speicherung, Atermes für das Kabinett, Airbus für Simulationstool und Komplettlösung, Fraunhofer ISE für Brennstoffzellensystem und die H₂-Speicherung.

1 1,5 kW Brennstoffzellensystem Enersta.

Die modulare Energieversorgung wurde auf Basis einer Ertragssimulation für den Standort Elancourt bei Paris ausgelegt und soll das ganze Jahr rund um die Uhr eine Leistung von 1 kW netto erzeugen, um eine Telekommunikationseinrichtung mit Energie zu versorgen. Windgeneratoren und Solarmodule laden einen Batteriespeicher auf, aus dem die Verbraucher betrieben werden. Bei Energieüberschuss wird Wasserstoff über Elektrolyse erzeugt und bei 30 bar in drei Einzeltanks zwischengespeichert. Sobald der Ladezustand der Batterie unter einen definierten Wert gesunken ist, springt die Brennstoffzelle an und lädt den Batteriespeicher auf einen definierten Ladezustand.

Für eine lückenlose Energieversorgung wird dabei ein Brennstoffzellensystem mit einer Ausgangsleistung von 1,5 kW benötigt. Auf Basis eines kommerziell erhältlichen Brennstoffzellen-Stacks der Proton Motor Fuel Cell GmbH entwickeln wir ein wirkungsgradoptimiertes System. Bei der Auslegung des Systems werden Kaltstartfähigkeit, geringer Energieverbrauch der Systemkomponenten sowie der montagefreundliche Aufbau berücksichtigt.

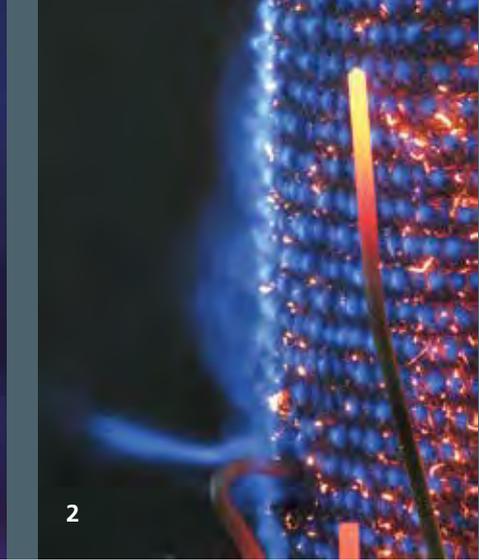
Durch eine optimierte An- und Abfahrstrategie des Stacks wird die Degradation des Brennstoffzellenstacks vermindert. In unserer Klimakammer überprüfen wir das System und die Betriebsführung auf Funktionalität bei extremen Witterungsbedingungen von -20 °C bis +60 °C und bereiten die Testphase der Anlage ab 2014 vor.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.

www.h2-ise.de



1



2

NEUES VERDAMPFUNGSVERFAHREN – SAUBERE ZUKUNFT FÜR DIE ÖLHEIZUNG

In der Hausenergieversorgung sinkt der Primärenergiebedarf sowohl durch eine bessere Gebäudedämmung als auch durch den vermehrten Einsatz solarthermischer Anlagen oder Lüftungsanlagen mit Wärmerückgewinnung. Der geringere Wärmebedarf verstärkt die Nachfrage nach modulierenden Heizsystemen, die den konstant hohen Leistungsbedarf für die Warmwasserbereitung und den niedrigen Leistungsbedarf für die Bereitstellung der Heizwärme abdecken können. Herkömmliche Öl-brenner können jedoch bauartbedingt nicht modulieren. Wir haben deshalb gemeinsam mit den Industriepartnern Herrmann GmbH & Co. KG, Solvis GmbH & Co. KG, Elster GmbH und der Umicore AG & Co. KG einen Öldampfbrenner entwickelt, der effizient verbrennt, modulieren kann und gleichzeitig die Emissionen senkt.

Thomas Aicher, **Robert Szolak**, Christopher Hebling

Herzstück des Öldampfbrenners ist ein am Fraunhofer ISE entwickelter katalytischer Prozess, der Heizöl und andere flüssige Kohlenwasserstoffe rückstandsfrei verdampfen kann. Durch die Verdampfung des Kraftstoffs kann die Gemischbildung mit der Verbrennungsluft deutlich verbessert werden. Die Gemischbildung ist ein entscheidendes Kriterium für die Qualität der Verbrennung. Eine schlechte Gemischbildung führt zu erhöhten Emissionen wie Stickoxide, Kohlenmonoxid, Kohlenwasserstoffe und Ruß. Die Verdampfungseinheit wird dem Brenner einfach vorgeschaltet. Dadurch kann Heizöl in Gasbrennern emissionsarm und effizient verbrennen. Zudem kann die bestehende kostengünstige Gerätekonfiguration aus dem Bereich der Gasverbrennung nun auch für Öl eingesetzt werden.

1 Das neue Verdampfungsverfahren für flüssige Brennstoffe verbessert die Gemischbildung und ist vielseitig einsetzbar, z. B. für neue Brennerkonzepte, für die Gaserzeugung in Brennstoffzellensystemen, für die Turbinentechnik sowie für motorische Prozesse.

2 Ein mit Öldampf betriebener Gasbrenner. Die blaue Flammenfärbung zeigt, dass der Öldampf emissionsarm wie ein Gas verbrannt werden kann.

Erste Untersuchungen am Fraunhofer ISE an Gasbrennern von Solvis und Herrmann zeigten, dass die Emissionswerte im gesamten Modulationsbereich von 5 bis 15 kW thermischer Leistung unterhalb der vorgeschriebenen Grenzen liegen. Dazu trägt auch der weite Modulationsbereich bei, der die Zahl der Brennerstarts deutlich senkt. Außerdem werden die Stickoxide gegenüber bekannten Öl-brennern reduziert. Sowohl die Norm DIN EN 267 als auch die Erste Bundesimmissionschutzverordnung werden erfüllt. Der Öldampfbrenner eignet sich auch zur Aufstellung in Wohnräumen, da er leiser als ein normaler Öl-brenner ist.

Das Forschungsvorhaben läuft bis Ende 2014 und dient der Entwicklung eines Prototyps als Vorstufe zur Produktentwicklung. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.

SYSTEMINTEGRATION UND NETZE – STROM, WÄRME, GAS



Die Transformation unseres Energiesystems in eine karbonfreie Energieversorgung stellt uns vor gewaltige innovative Herausforderungen. Die Energieszenarien der letzten Jahre haben gezeigt, dass diese große Aufgabe nur durch die geeignete Kombination und Integration verschiedener Energiesysteme und Netzstrukturen erreicht werden kann. Im Bereich der Stromnetze wird seit einiger Zeit das Smart Grid diskutiert, das ein optimales Zusammenspiel von Energiesystemen im liberalisierten Energiemarkt ermöglichen soll. Im »E-Energy«-Programm der Bundesregierung wurde die Smart-Grid-Technologie mit einem Fokus auf die IKT-Systeme untersucht. Das Fraunhofer ISE erforschte im Projekt »eTelligence« die Integration von dezentralen Erzeugern an einem regionalen Energiemarktplatz.

Die Integration von Strom- und Wärmesektor ermöglicht den Ausgleich der vermehrten Fluktuation im Stromnetz, die durch den Eintrag von erneuerbaren Energien entsteht. Dabei wird beispielsweise die Stromerzeugung von Strom-Wärme-geführten KWK-Systemen in die abendliche Lastspitze verschoben, oder auch die thermische Wandlung von Überschussstrom mit Wärmepumpen und elektrischen Heizstäben in Wärme genutzt. Die Betriebsführungssysteme spielen hierbei eine zentrale Rolle, denn es geht nicht nur um zeitgerechte Bereitstellung von Strom und Wärme, sondern auch um die vorausschauende Bewirtschaftung von Speichersystemen. So kommen heute schon virtuelle Kraftwerke zum Einsatz, die eine Optimierung der Stromproduktion mit Hilfe von thermischen Pufferspeichern bewerkstelligen, indem die Spotmarktpreise und Wettervorhersagen für die Betriebsoptimierung zu Grunde gelegt werden.

Im Bereich der Quartierskonzepte liegt der Fokus der Forschungsarbeiten des Fraunhofer ISE bei den Wärmenetzen, die eine Einbindung von BHKW-Systemen und thermischen Speichern ermöglichen. Zielsetzung ist dabei, eine primärenergetische Versorgungsoptimierung unter Berücksichtigung der ökonomischen Faktoren für den urbanen Raum zu entwickeln. Ein noch umfassenderes Bild liefern die Smart Energy Cities. Sie zielen auf eine gesamtheitliche Optimierung des urbanen Raums ab, indem die Versorgungsstruktur und das Mobilitätskonzept den Anforderungen aus der erneuerbaren Energiebereitstellung angepasst werden. Mit dem Fraunhofer Programm »Morgenstadt« wurden erstmals Konzepte für diese Stadt der Zukunft entwickelt.

Für alle Themenbereiche des Geschäftsfelds stellt die Modellierung und Simulation von Energiesystemen und Netzen eine wichtige Grundlage dar, da sie eine Analyse der Energieströme ermöglichen. Sie werden ebenso genutzt, um Kommunikations- und Steuerungssysteme für die Komponenten und die Betriebsleittechnik zu entwickeln. Im Mittelpunkt der FuE-Arbeiten stehen hierbei die dezentralen Energiesysteme. Die Aktivitäten erstrecken sich bis hin zur autonomen Stromversorgung und zu Inselnetzen, bei denen die Speicherbewirtschaftung im Fokus steht. Die Arbeitsbereiche umfassen auch dezentrale Wasseraufbereitungssysteme, die oftmals mit solarthermischen und PV-Anlagen betrieben werden.

Perspektivisch rückt bei der Strukturveränderung unserer Energiesysteme die Wasserstofftechnik in den Mittelpunkt. Sie verspricht auch die saisonale Speicherung erneuerbarer Energie durch die Kopplung von Gas- und Stromnetzen. Bei der Power-to-Gas-Technologie wird mittels Elektrolyse Wasserstoff für die dezentrale Speicherung oder die Einspeisung in das existierende Netz bereitgestellt. Am Fraunhofer ISE wurde eine solare Wasserstoff-Tankstelle in Betrieb genommen, die demonstriert, dass heute schon alle Komponenten für die Nutzung von Wasserstoff für die emissionsfreie Mobilität verfügbar sind.

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	79
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	59
Zeitschriften- und Buchbeiträge	17
Vorträge und Konferenzbeiträge	32

www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/45



Im SmartEnergyLab des Fraunhofer ISE steht eine vollständige Ausstattung von dezentralen Erzeugungstechnologien und Speichern künftiger Wohngebäude zur Verfügung. So können Einzelkomponenten und Gesamtkonzepte evaluiert werden.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Christof Wittwer

Telefon +49 761 4588-5115
christof.wittwer@ise.fraunhofer.de

Betriebsführung von Energieversorgungssystemen

Dipl.-Ing. Sebastian Herkel

Telefon +49 761 4588-5117
sys.operation@ise.fraunhofer.de

Smart Energy Cities

Dipl.-Phys. Gerhard Stryi-Hipp

Telefon +49 761 4588-6686
sys.sec@ise.fraunhofer.de

Quartierskonzepte und Wärmenetze

Dipl.-Ing. Florian Kagerer M. Sc.

Telefon +49 761 4588-5308
sys.quartiers@ise.fraunhofer.de

Elektrische Verteilnetze und Betriebsmittel

Dr.-Ing. Bernhard Wille-Haußmann

Telefon +49 761 4588-5443
sys.smartgrid@ise.fraunhofer.de

IKT für Komponenten im Smart Grid

Dr. Robert Kohrs

Telefon +49 761 4588-5708
sys.ict@ise.fraunhofer.de

Power-to-Gas

Dr. Christopher Hebling

Telefon +49 761 4588-5195
sys.ptg@ise.fraunhofer.de

Energetische Biomassenutzung

Dr.-Ing. Achim Schaadt

Telefon +49 761 4588-5428
sys.biomass@ise.fraunhofer.de

Autonome Stromversorgungen und Inselnetze

Dr. Matthias Vetter

Telefon +49 761 4588-5600
sys.ugrids@ise.fraunhofer.de

Solare Entsalzung

Dr.-Ing. Joachim Koschikowski

Telefon +49 761 4588-5294
sys.water@ise.fraunhofer.de



ENTWICKLUNG LÄNDLICHER REGIONEN MIT HILFE VON PHOTOVOLTAIK

Das Fraunhofer ISE vertritt aufgrund seiner 30jährigen Erfahrungen im Bereich der netzfernen Energieversorgung Deutschland im Task 9 »Deploying PV Services for Regional Development« im »Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS)« der Internationalen Energie Agentur (IEA). Der Task 9 hat das Ziel, die Bedeutung der Photovoltaik als technisch relevante und kosteneffektive Technologie zur Stromerzeugung in Entwicklungsländern zu verbreiten. Durch die internationale Kooperation kann das Fraunhofer ISE im Bereich der erneuerbaren Energien wesentlich zu Erkenntnisprozessen im Ausland beitragen und erhält umgekehrt Einblick in neue technologische und wirtschaftliche Entwicklungen anderer Länder.

Adnan Al-Akori, **Georg Bopp**, Fabian Himmelsbach, Brisa Ortiz, Norbert Pfanner, **Friedemar Schreiber**, Matthias Vetter, Günther Ebert

Neben Deutschland, vertreten durch das Fraunhofer ISE, beteiligen sich unter der Leitung von Frankreich auch Dänemark, Schweden, Schweiz und Japan an den Arbeiten des Task 9. Die Arbeitsgruppe befasst sich mit den Themen »Zugang zu modernen und nachhaltigen Stromdienstleistungen« sowie »Effektiver Einsatz von Photovoltaik und erneuerbaren Energien in Entwicklungsländern«. Die Aktivitäten konzentrieren sich auf die Verbreitung von Informationen zu Energieversorgungssystemen mit den Schwerpunkten Photovoltaik für die Energieversorgung in Dörfern (Trinkwasserversorgung, Gesundheitszentren, Kleinstsysteme für Beleuchtung und integrierte Kommunikationslösungen), Photovoltaik in Inselnetzen und Hybridsystemen, Integration von Photovoltaik in städtischen Gebieten, Photovoltaik-Großanlagen und innovative Geschäftsmodelle. Die Erfahrungen werden durch

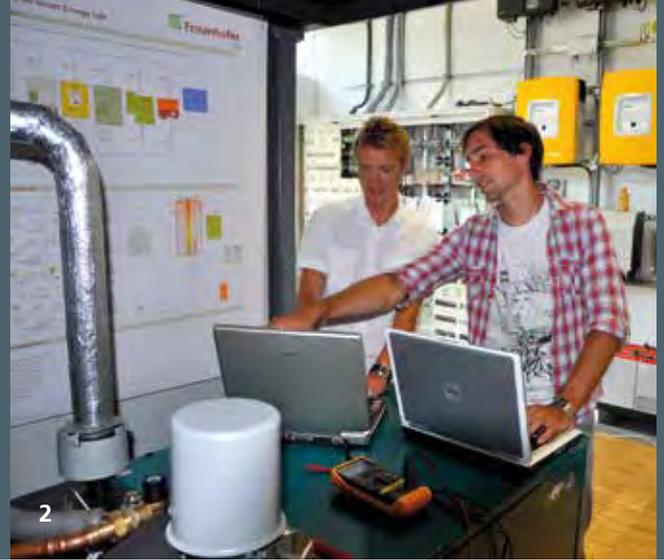
- 1 Solarversorgte LED-Leuchte, ein typisches Pico PV-System.
- 2 Ein Fischerjunge reinigt das PV-Modul eines Pico PV-Systems in der Küstenregion im Süden Jemens.



die Erarbeitung von Handbüchern, Veröffentlichungen und die Durchführung von Trainingsseminaren in den Zielländern verbreitet.

Durch regelmäßige Projekttreffen und Workshops besteht ein reger Erfahrungsaustausch zwischen den Experten der vertretenen Länder. Das Fraunhofer ISE hat maßgeblich an den Handbüchern »Pico Solar Systems for Remote Homes« und »Rural Electrification with PV Hybrid Systems« sowie einem Leitfaden zur Auslegung und Simulation von PV-Hybridsystemen mitgearbeitet. Unter Leitung des Fraunhofer ISE entsteht des Weiteren ein Handbuch mit Erfahrungen zu Krankenstationen, die mit PV versorgt werden. In Web-Seminaren oder Workshops wie beispielsweise in Myanmar (März 2013) werden die erarbeiteten Inhalte an Vertreter aus Entwicklungsländern weitergegeben.

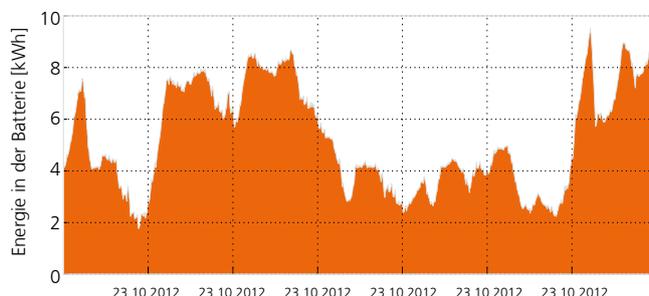
Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) finanziert.



CHANCEN UND HERAUSFORDERUNGEN VON SOLARBATTERIESYSTEMEN

Die Netzparität von Solarstrom in Bezug auf den Haushaltskundenstrompreis macht den Eigenverbrauch von lokal erzeugtem Solarstrom zunehmend interessant. Effiziente und langlebige Batterien ermöglichen künftig den Einsatz von Speichern zur Erhöhung des Eigenverbrauchs. Aufgrund der momentan noch hohen Preise für Batteriesysteme ist jedoch die Erschließung weiterer Einnahmequellen sinnvoll, um die Wirtschaftlichkeit von Batterien zu steigern und den höchstmöglichen Nutzen für das Energiesystem zu erzielen. Im Projekt »Net-PV« untersuchen wir Chancen und Nutzen unterschiedlicher Betriebsstrategien für Solarbatteriesysteme sowie die Kombination innovativer Geschäftsmodelle.

Georg Bopp, Martin Llerena Engesser, Thomas Erge, **Raphael Hollinger**, Bernhard Wille-Haußmann, Christof Wittwer, Günther Ebert



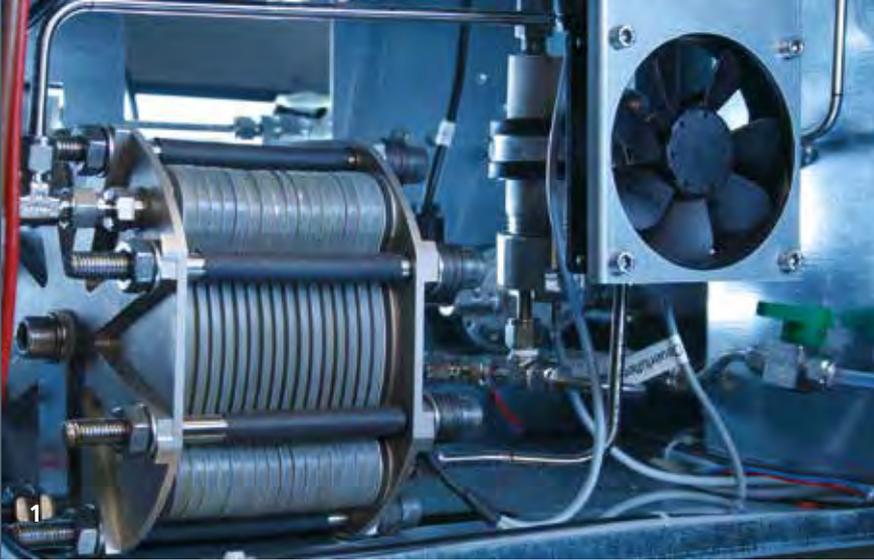
3 *Beispielhafter Verlauf der Energie in einer Batterie eines Einfamilienhauses mit PV-Anlage, die neben der Erhöhung des lokal verbrauchten PV-Stroms auch Primärregelung als Serviceleistung für die Übertragungsnetzbetreiber bereitstellt. Die beiden Geschäftsmodelle ergänzen sich dabei gegenseitig und ermöglichen einen wirtschaftlichen Einsatz der Batterie.*

1 *Netzserviceleistungen können in zunehmendem Maß aus dem Verteilnetz bereitgestellt werden.*

2 *Im SmartEnergyLab des Fraunhofer ISE werden neu entwickelte Konzepte umgesetzt und getestet.*

In der »Speicherstudie 2013 – Kurzgutachten zur Abschätzung und Einordnung energiewirtschaftlicher, ökonomischer und anderer Effekte bei Förderung von objektgebunden elektrochemischen Speichern« wurde nachgewiesen, dass dezentrale Solarspeicher Netzdienstleistungen erbringen können. Im Projekt »Net-PV« untersuchen wir die Aussichten für einen wirtschaftlichen Einsatz von Solarbatteriesystemen nach Auslaufen des Erneuerbare-Energien-Gesetzes und der Förderung von Solarbatteriesystemen (die seit 1.5.2013 in Kraft ist). Hierzu wurden unterschiedliche Geschäftsmodelle und deren Kombination analysiert. Die Kernelemente sind dafür die Regelleistung – Netzserviceleistung, die die Übertragungsnetzbetreiber im Zuge der Frequenzhaltung auf Regelleistung.net ausschreiben – in Kombination mit der Reduzierung der Lastspitze des Netzes zum übergeordneten Netz. Dies führt neben den Einnahmen aus der Regelleistungsbereitstellung zur Maximierung der Vergütungen vermiedener Netznutzungsentgelte und zur Erhöhung des Eigenverbrauchs und stellt damit eine wirtschaftlich hoch interessante Kombination von Geschäftsmodellen dar. Erste Simulationsergebnisse (Abb. 3) bestätigen das Potenzial der Kombination der drei Geschäftsmodelle. 2015 folgt ein umfangreicher Feldtest im Netzgebiet der Stadtwerke Schwäbisch Hall, bei dem erstmals die Bereitstellung von Primärregelung mit dezentralen Solarbatteriesystemen bei Privathaushalten praktisch umgesetzt wird.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und den Industriepartnern Stadtwerke Schwäbisch Hall, Saft Batterien GmbH, E3-Energie Effizienz GmbH und KACO new energy GmbH unterstützt.



EFFIZIENTE BETRIEBSFÜHRUNG VON ELEKTROLYSEUREN IN POWER-TO-GAS-SYSTEMEN

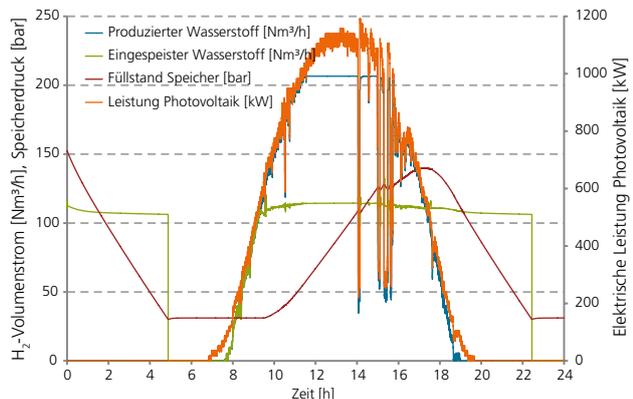
Wasserstoff ist ein vielversprechender Sekundärenergie-träger, der künftig für ein breites Anwendungsspektrum genutzt werden kann. Da er großtechnisch und CO₂-neutral durch elektrolytische Wasserspaltung hergestellt werden kann, stellen Elektrolyseure eine Schlüsselkomponente im sogenannten Power-to-Gas- (PtG-) Konzept dar. Die Integration solcher Wasserstoffgeneratoren in die Energiewirtschaft erfordert ein grundlegendes Verständnis dieser Anlagen. Durch stationäre und dynamische Systemsimulation bilden wir das Betriebsverhalten verschiedener Elektrolyseure und Power-to-Gas-Anlagen realitätsnah ab und untersuchen so technische und ökonomische Szenarien zur Betriebsführung und Systemintegration.

David Müller, **Tom Smolinka**, Christopher Voglstätter, Arne Raphael Werner, Christopher Hebling

Durch den stetigen Ausbau erneuerbarer Energien steigt der Bedarf nach Möglichkeiten zur flexiblen und sicheren Regelung der elektrischen Verbundnetze und der Speicherung der elektrischen Energie. Das Power-to-Gas-Konzept verbindet den Ansatz des aktiven Last- und Erzeugungsmanagements mit der Idee, Strom aus erneuerbaren Energien in Form von chemischer Energie zwischenspeichern. In Zeiten großen Angebots wird elektrischer Strom in Elektrolyseuren zur Spaltung von Wasser in Sauerstoff und Wasserstoff verwendet. Der erzeugte Wasserstoff kann vor Ort zwischengespeichert werden und / oder in ein Gasleitungsnetz eingespeist werden, um dann später nach Bedarf in verschiedenen Anwendungen (z. B. Mobilität, Rückverstromung, chemische Industrie) eingesetzt zu werden.

In Abb. 2 ist exemplarisch das dynamische Verhalten einer PtG-Anlage (Gleichrichter, Elektrolyseur, Gasreinigung und -trocknung, Kompressor, Pufferspeicher und Einspeiseventil),

1 Zur Datenvalidierung unserer Modelle vermessen wir Laborsysteme oder nutzen Daten von Feldtestanlagen. Im Bild ist ein Membran-Druckelektrolysezellstapel des Fraunhofer ISE zu sehen.



2 Dynamisches Verhalten einer PtG-Anlage mit PEM-Druckelektrolyseur, der dem Leistungsprofil (orange) einer Photovoltaikanlage im Tagesgang folgt. Der produzierte Wasserstoff (blau) wird unter Druck zwischengespeichert (rot) und bedarfsgerecht in eine Erdgasleitung eingespeist (grün). Zum besseren Verständnis wird nur eine konstante Einspeisekapazität angenommen.

die dem Einspeiseprofil einer PV-Anlage folgt, dargestellt. Der hier simulierte PEM-Druckelektrolyseur kann problemlos dem Tagesgang der PV-Anlage folgen. Der Zwischenspeicher wird benutzt, um die Wasserstoffeinspeisung der Gasleitung anzupassen. Mit Hilfe des Simulationstools sind wir in der Lage, eine umfangreiche technologische Bewertung durchzuführen sowie auch eine Grobdimensionierung solcher Anlagen vorzunehmen. In weiteren Arbeiten wird die technische Simulation mit Marktmodellen verknüpft, um so verschiedene Geschäftsmodelle betrachten und evaluieren zu können.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) unterstützt.



© FWTM Freiburg

INTEGRALE ENERGIEKONZEPTE FÜR STÄDTE UND QUARTIERE

Der städtische Raum ist für die Umsetzung der Energiewende ein zentrales Handlungsfeld. Neben der Senkung des Energiebedarfs der Gebäude durch Sanierung des Gebäudebestands ist die Transformation der urbanen Energieversorgungssysteme notwendig. Hierfür werden am Fraunhofer ISE Bewertungs- und Planungsmethoden entwickelt, die diese Transformationsprozesse unterstützen und begleiten. Im Rahmen des Fraunhofer Vorhabens »Morgenstadt City Insights« wurden interdisziplinär Transformationsprozesse in Kommunen weltweit analysiert. Im Modellvorhaben »Energiequartier Haslach« der Stadt Freiburg hat das Fraunhofer ISE Zielszenarien für die Entwicklung des Energiesystems dieses Stadtteils entwickelt.

Jörg Dengler, Arnulf Dinkel, Jan-Bleicke Eggers, Sebastian Gölz, **Sebastian Herkel**, Sattaya Narmsara, Dominik Nören, Gerhard Stryi-Hipp

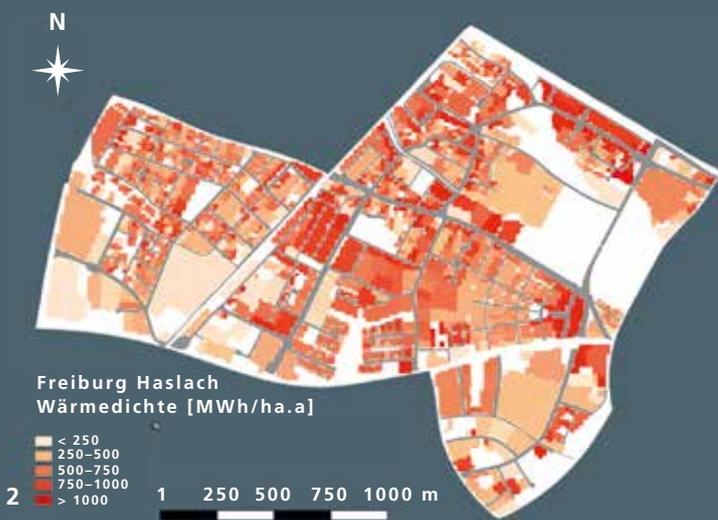
m:ci Morgenstadt

Im Rahmen des Fraunhofer-Vorhabens »m:ci Morgenstadt City Insights« mit über 30 Partnern aus Wirtschaft und Kommunen weltweit wurden sechs Kommunen – unter anderem Tokio, Kopenhagen, Singapur und Freiburg – hinsichtlich ihrer Transformationsprozesse zu mehr Nachhaltigkeit analysiert. Das Fraunhofer ISE koordinierte dabei den Energiesektor. Grundlage der Analyse der kommunalen Strategien zur Transformation des Energiesystems war die Entwicklung geeigneter Indikatoren. Den wichtigsten Indikator stellt der Endenergieverbrauch pro Kopf dar. Zentraler Indikator für Fortschritte in Richtung eines nachhaltigen Energiesystems ist der Anteil erneuerbarer Energien am Gesamtenergiebedarf. Die Verfügbarkeit von statistischen Daten über die durch den Energiesektor erzeugten Emissionen ist entscheidend für die Erfolgskontrolle der Energiepolitik. Die europäischen Städte Freiburg, Berlin und Kopenhagen haben dafür entsprechende

1 Freiburg im Breisgau ist eine der sechs Kommunen weltweit, die im Rahmen des Projekts »m:ci Morgenstadt City Insights« hinsichtlich ihrer Transformationsprozesse zu mehr Nachhaltigkeit analysiert werden. Das Fraunhofer ISE koordinierte in diesem Vorhaben die Untersuchungen zum Energiesektor.

Mechanismen etabliert. Die Auswertung von Praxisbeispielen in Freiburg, Kopenhagen, Singapur und Tokio zeigt, dass sich aufgrund der lokalen Bedingungen die Energiezielsysteme deutlich unterscheiden und auch die Wege dorthin individuell definiert werden müssen. Die Grundkonzepte sind jedoch sowohl hinsichtlich der einsetzbaren Technologien als auch der notwendigen Prozesse ähnlich. Hohe Wirkungsgrade bei Umwandlung und Verteilung, Reduktion des Energiebedarfs mit besonderem Fokus auf energieeffizienten Gebäuden, eine vollständige Ausnutzung des lokalen Potenzials an erneuerbaren Energien und die Zusammenarbeit mit den umliegenden Regionen zur breiteren Nutzung erneuerbarer Energien sind wichtige Bausteine.

Die Analyse zeigt, dass eine erfolgreiche Umsetzung dann möglich ist, wenn klare Ziele definiert werden, ein systemischer Ansatz verfolgt wird und starke kommunale Strukturen vorhanden sind, die die Zielerreichung überwachen und Zielsetzungen anpassen. Zudem sind Leuchtturmprojekte, wie eine nachhaltige Umsetzung kleiner Projekte und die Einbindung aller relevanten Akteure, wichtig. Abb. 3 zeigt die Analyse der Wirkungszusammenhänge von Zielsetzung, Umsetzung und Monitoring, sie gibt Anhaltspunkte für Handlungsmöglichkeiten sowohl von kommunalen Akteuren als auch von Wirtschaftspartnern, um die Energiewende auf lokaler Ebene zu gestalten und hierfür Geschäftsmodelle zu entwickeln.



2 Energiequartier Haslach: Auf Basis der Dichte des Wärmebedarfs und von Stromlastprofilen werden Wärme- und Strom-Versorgungsszenarien entwickelt und optimiert. In Verbindung mit Potenzialen von erneuerbaren Energien lassen sich so auch Standorte für Speicher identifizieren.

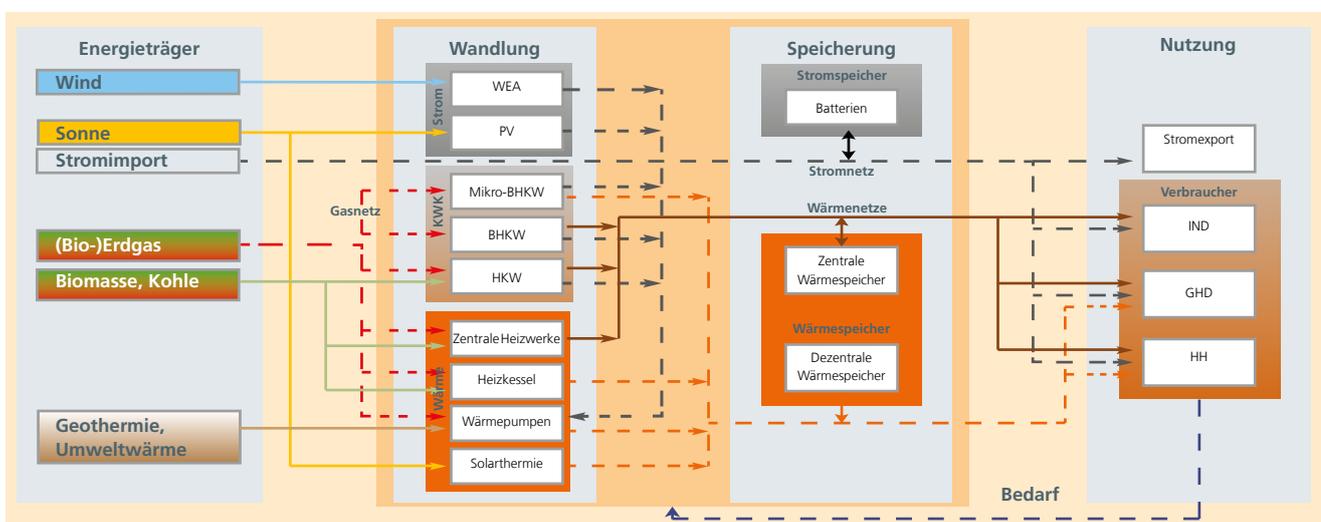
Energiequartier Haslach

Das Ziel, bis 2050 eine klimaneutrale Energieversorgung in Kommunen zu erreichen, bedarf neuer Instrumentarien, um diesen Prozess zu gestalten. Im Rahmen des Modellvorhabens »Energiequartier Haslach« der Stadt Freiburg setzt das Fraunhofer ISE neue Werkzeuge zur Planung von integrierten Energiesystemen ein. Ein wichtiger Baustein ist die Identifikation von kostenoptimalen Sanierungskonzepten und darauf angepasste Energieversorgungssysteme. Im untersuchten Quartier Haslach wurden hierzu auf den Stadtteil angepasste Gebäudetypologien entwickelt, die den aktuellen Sanierungsstand berücksichtigen. Darauf basierend wurden konkrete, wirtschaftlich realisierbare Maßnahmenpakete entwickelt, die in der Energieberatung im Stadtteil eingesetzt werden. Grundlage ist die Entwicklung eines Zielszenarios, das für die lokalen Randbedingungen im Quartier ein kostenoptimales Energieversorgungssystem darstellt. Das zur Berechnung ein-

gesetzte Simulationsmodell »KomMod« berücksichtigt dabei sowohl lokale räumliche Unterschiede als auch die zeitliche Verfügbarkeit einzelner Energieträger (Abb. 2). Auf Basis der Gebäudetypologie wurden Szenarien für die Entwicklung des Energiebedarfs berechnet und Modelle für die Lastzeitreihen entwickelt. Damit werden z. B. die für die Wirtschaftlichkeit einer netzgebundenen Versorgung wie der Fernwärme wichtige Wärmedichte und die im Stadtteil verfügbaren Potenziale der erneuerbaren Energien wie Geothermie, Photovoltaik oder Solarthermie berücksichtigt. Auf Basis der Rechnungen können fundierte Entscheidungen für die Weiterentwicklung des kommunalen Energieversorgungssystems getroffen und entsprechende Anreize geschaffen werden.

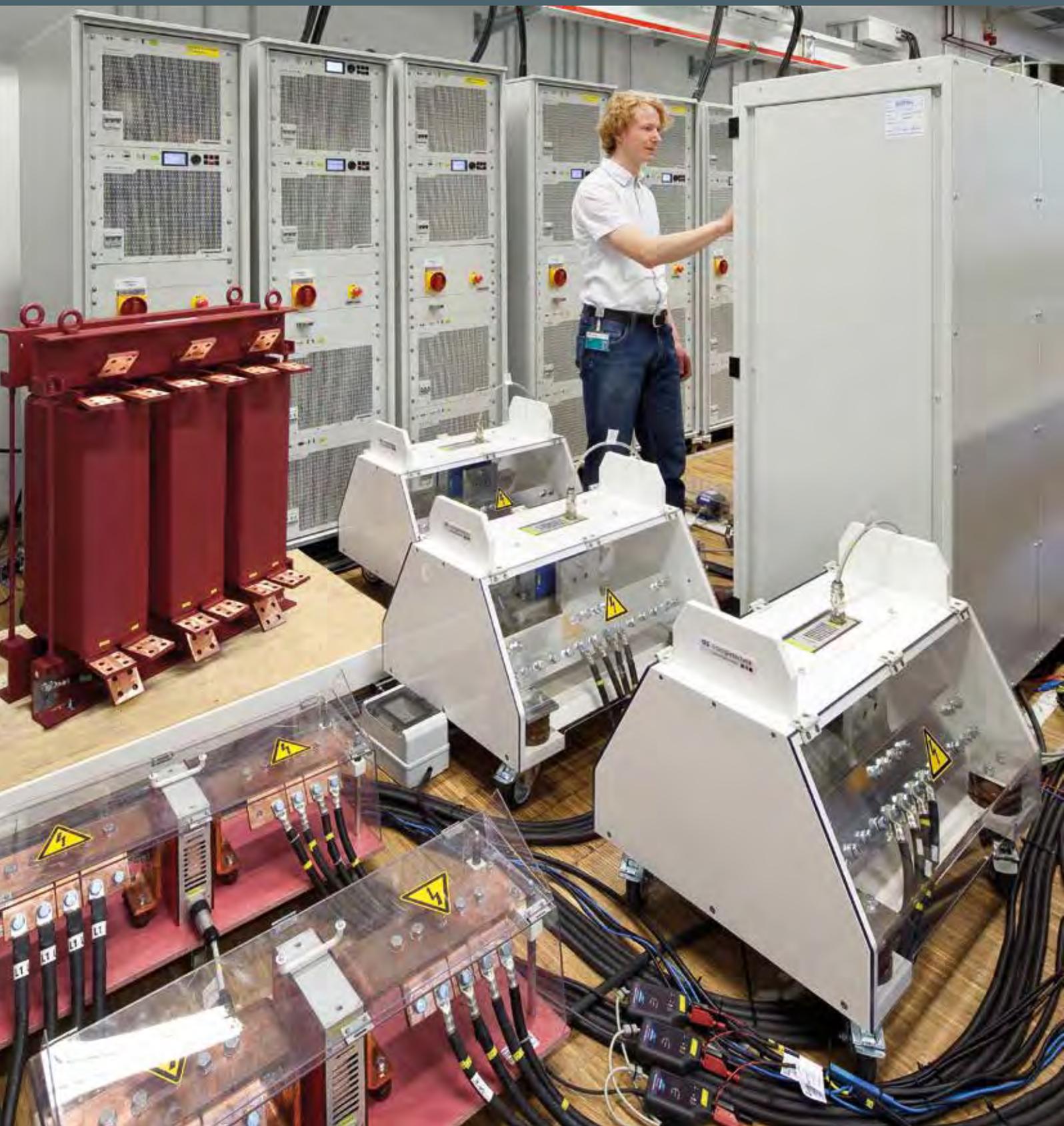
Das Vorhaben wird von der Stadt Freiburg finanziert.

www.freiburg.de/energiequartier-haslach



3 Das Energiesystemmodell »KomMod« ermittelt auf Basis von zeitlich aufgelösten dynamischen Jahressimulationen ein für die jeweilige Kommune optimalen Energiemix verbunden mit geeigneten Netzstrukturen und Betriebsmitteln.

ENERGIEEFFIZIENTE LEISTUNGSELEKTRONIK



Leistungselektronik zählt heute in Bereichen wie der Energieversorgung, der Antriebstechnik oder der Fahrzeugindustrie zu den Schlüsseltechnologien. Insbesondere für den Umbau unserer Energieversorgung ist sie von fundamentaler Bedeutung. Durch die stetige Weiterentwicklung der elektronischen Bauelemente und verbesserte Schaltungskonzepte können viele leistungselektronische Komponenten und Systeme heute kleiner, leichter, effizienter und kostengünstiger realisiert werden, oder es sind ganz neue Funktionalitäten überhaupt erst möglich geworden.

Das Fraunhofer ISE entwickelt leistungselektronische Komponenten und Systeme für viele Anwendungsgebiete. Schwerpunkte sind Wechsel- und Umrichter, Wandler und Steuerungen für den Einsatz in der Energieversorgung und -übertragung. Besonderes Augenmerk liegt dabei auf der optimalen Einbindung in das Gesamtsystem und das Erreichen höchster Energieeffizienz.

Wechsel- und Umrichter, DC/DC-Konverter und Laderegler sind die zentralen Komponenten sowohl zur Aufbereitung der elektrischen Energie von Stromerzeugern wie PV-Anlagen, Windkraftanlagen und BHKWs als auch zur Systemintegration von elektrischen Speichersystemen. Das Fraunhofer ISE entwickelt hocheffiziente Komponenten für alle Anwendungen im Leistungsbereich von unter 100 Watt bis in die Megawatt-Klasse. Es ist auf diesem Gebiet seit Jahrzehnten der weltweit führende Forschungs- und Entwicklungspartner für die Industrie und kann mittlerweile auch auf viele patentierte Schaltungskonzepte zurückgreifen. So konnten vor einigen Jahren mit der am Fraunhofer ISE entwickelten HERIC®-Topologie und dem Einsatz modernster elektronischer Bauelemente erstmals Wechselrichterwirkungsgrade von über 99% erreicht werden.

Darüber hinaus erfordert der Ausbau der Photovoltaik künftig auch bei Komponenten wie Wechselrichtern deutliche Preissenkungen. Auch hierzu werden am Fraunhofer ISE neue Lösungen erarbeitet. Besonders vielversprechend ist der Einsatz modernster aktiver und passiver Bauelemente wie Transistoren aus Siliciumkarbid oder Galliumnitrid. So wird es zukünftig möglich sein, mit Schaltfrequenzen bis in den MHz-Bereich zu arbeiten, was den Einsatz kleinerer Induktivitäten erlaubt und so einen erheblich kompakteren und kostengünstigeren Aufbau ermöglicht. Weitere Herausforderungen sind steigende Anforderungen an die Qualität der Ausgangsspannung und die Regeleigenschaften sowie die Integration von Zusatzfunktionen wie das Bereitstellen von Blindleistung.

Am Fraunhofer ISE entwickelte Komponenten finden aber auch Anwendung in weiteren Industriezweigen wie der Fahrzeugtechnik oder in der Luftfahrt. Häufig lassen sich Konzepte oder Lösungen, die ursprünglich für die Photovoltaik entwickelt wurden, auf diese Anwendungsgebiete übertragen. So haben Ingenieure des Fraunhofer ISE ein bidirektionales Schnellladegerät zur Ladung von Elektrofahrzeugen mit einer Leistung von 22 Kilowatt und einem Wirkungsgrad von über 98% entwickelt, das so kompakt ist, dass es sich sowohl in externen Ladestationen als auch on-board verwenden lässt. Konzepte aus der Photovoltaik führten zu Volumenreduktion und besseren Produkteigenschaften. Neben einer breiten Palette von leitungsgebundenen Ladesystemen arbeitet das Fraunhofer ISE auch an induktiven Hochleistungs-Ladesystemen mit über 20 Kilowatt Nennleistung. Damit lässt sich der zukünftig zu erwartende Wunsch nach kabelloser Ladung von Elektrofahrzeugen ebenso erfüllen wie die Bereitstellung von Netzstützungsfunktionen.

Das Fraunhofer ISE besitzt umfangreich ausgestattete Labors mit modernsten Generatoren sowie Mess- und Prüfgeräten. Selbstverständlich sind dort auch alle Prüfungen nach den einschlägigen Geräternormen und internationalen Netzeinspeiserichtlinien möglich. Zusammen mit Industriekunden führt das Fraunhofer ISE auch den in nur wenigen Labors möglichen Low-Voltage-Ride-Through-Test, mit dem Netzspannungseinbrüche im Mittelspannungsnetz untersucht werden können, durch. Zudem bringt das Fraunhofer ISE seine umfangreichen Erfahrungen auch in die internationale Normenarbeit ein.

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt 49

Mitarbeiter vollzeitäquivalent 41

Zeitschriften- und Buchbeiträge 2

Vorträge und Konferenzbeiträge 25

www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/50



Das Wechselrichterlabor des Fraunhofer ISE bietet alle notwendigen Einrichtungen für die Prüfung von Zentralwechselrichtern bis zu einer Leistung von 1 MW nach diversen Netzspeise-Richtlinien.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Günther Ebert

Telefon +49 761 4588-5229
guenther.ebert@ise.fraunhofer.de

Netzgekoppelte Wechselrichter und Speichersysteme

Dr.-Ing. Olivier Stalter

Telefon +49 761 4588-5467
electronics.inverter@ise.fraunhofer.de

Netzferne Energiesysteme

Dipl.-Ing. Florian Reiners

Telefon +49 761 4588-5863
electronics.offgrid@ise.fraunhofer.de

Elektromobilität

Dipl.-Ing. Stefan Reichert

Telefon +49 761 4588-5476
electronics.mobility@ise.fraunhofer.de

Neue Bauelemente und Anwendungen

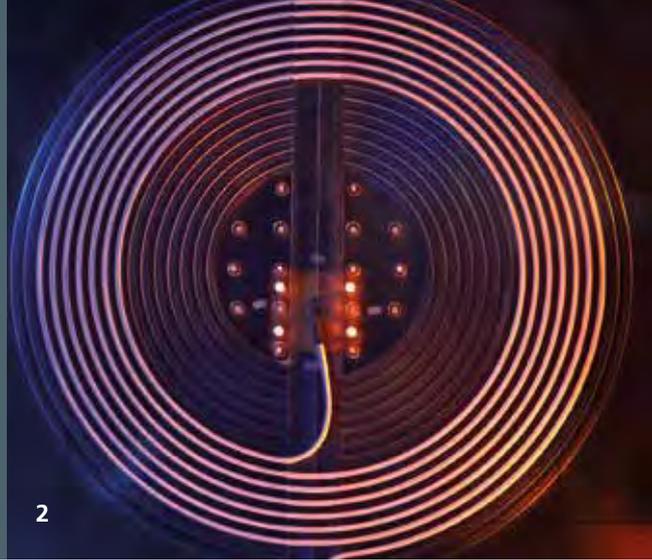
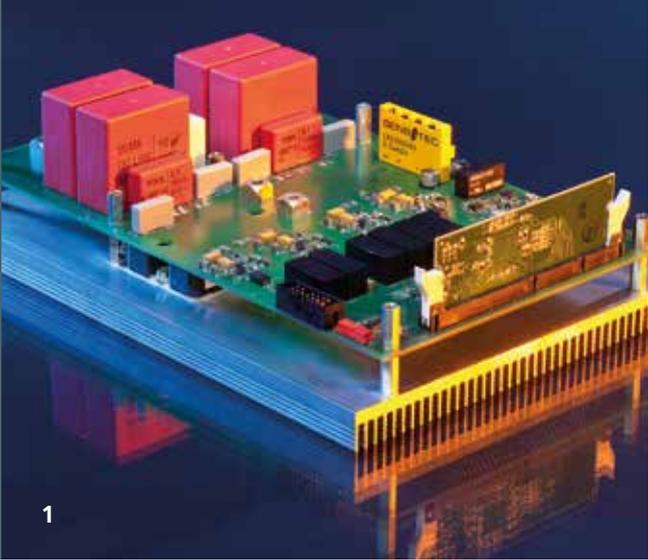
Dirk Kranzer M. Eng.

Telefon +49 761 4588-5546
electronics.devices@ise.fraunhofer.de

Stromnetze

Dipl.-Ing. Sönke Rogalla

Telefon +49 761 4588-5454
electronics.grid@ise.fraunhofer.de



HOCHEFFIZIENTE INDUKTIVE ENERGIEÜBERTRAGUNG FÜR ELEKTROFAHRZEUGE

Die berührungslose Energieübertragung findet mittlerweile ein großes technisches Anwendungsgebiet. Nicht nur für die Ladung von Kleingeräten, wie elektrische Zahnbürsten und Handys, sondern auch für die Elektromobilität wird diese Art des Energietransfers als zukunftsweisend erachtet. Das Fraunhofer ISE erforscht im Rahmen des Projekts »Gemeinschaftliche-e-Mobilität (GeMo)« die induktive Energieübertragung. Die dafür notwendigen leistungselektronischen Wandler, das Spulensystem sowie die Regelungstechnik werden am Fraunhofer ISE entwickelt. Durch den Einsatz neuer Leistungstransistoren aus Siliciumkarbid (SiC) konnten der Wirkungsgrad sowie der Leistungsbereich erheblich gesteigert werden.

Bruno Burger, Benriah Goeldi, **Stefan Reichert**,
Johannes Tritschler, Günther Ebert

Die kontaktlose induktive Energieübertragung lässt sich mit dem Prinzip eines Transformators vergleichen. In beiden Fällen wird durch eine primärseitige Wicklung ein wechselndes Magnetfeld aufgebaut, das in einer sekundärseitigen Wicklung eine Spannung induziert. Im Gegensatz zu einem Transformator wird das Magnetfeld jedoch nicht komplett durch einen Eisenkern geführt, sondern das Feld muss einen großen Luftspalt zwischen Primär- und Sekundärseite überbrücken. Aus diesem Grund durchdringt der magnetische Hauptfluss nur teilweise die sekundäre Spule und es entsteht ein hoher Streufluss.

Bei der induktiven Energieübertragung zur Ladung eines Elektrofahrzeugs wird die stationäre Spule in die Straße oder den Parkplatz eingelassen, während die zweite, mobile Spule in den Fahrzeugboden integriert wird. Eine Kabelverbindung zwischen Ladestelle und Elektrofahrzeug ist nicht mehr notwendig. Das System ist so konzipiert, dass auch eine

1 Resonanter leistungselektronischer Wandler zur Ansteuerung der stationären Spule in einem induktiven Energieübertragungssystem.

2 Prototyp einer Spule (Ø ca. 70 cm) zur kontaktlosen Energieübertragung zwischen stationärer Ladestation und Elektrofahrzeug.

Energieübertragung von der Fahrzeugbatterie zurück in das Stromnetz möglich ist. Dadurch kann Strom aus erneuerbaren Energiequellen in der Fahrzeugbatterie zwischengespeichert und Systemdienstleistungen, wie die Bereitstellung von Regelenergie, angeboten werden.

Eine besondere Herausforderung bei der induktiven Energieübertragung für Elektrofahrzeuge ist es, einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen. Durch den Einsatz neuer Halbleiterbauelemente aus Siliciumkarbid (SiC) kann die Effizienz der verschiedenen leistungselektronischen Wandler im gesamten Ladesystem erheblich gesteigert werden. Die geringen Schaltverluste der SiC-Transistoren erlauben eine hohe Taktfrequenz, wodurch der mechanische Aufbau sehr kompakt und deutlich leichter wird als bei konventionellen Geräten. Weitere Verluste können durch die Optimierung der Spulen und des Resonanzkreises minimiert werden. Durch Kompensation mit speziellen Kondensatoren auf stationärer wie mobiler Seite wird der Blindleistungsbedarf der Spulen und deren Streufelder kompensiert. Auch zwischen der Leistungselektronik und den Spulen muss keine Blindleistung ausgetauscht werden.

Die am Fraunhofer ISE entwickelten Prototypen eines induktiven Energieübertragungssystems erweisen sich als sehr effizient. Sie erzielen einen Wirkungsgrad für die induktive Übertragungsstrecke von 97,4% bei einem Spulenabstand von 13 cm. Die übertragbare Leistung beträgt dabei bis zu 22 kW.

www.gemo.fraunhofer.de



1



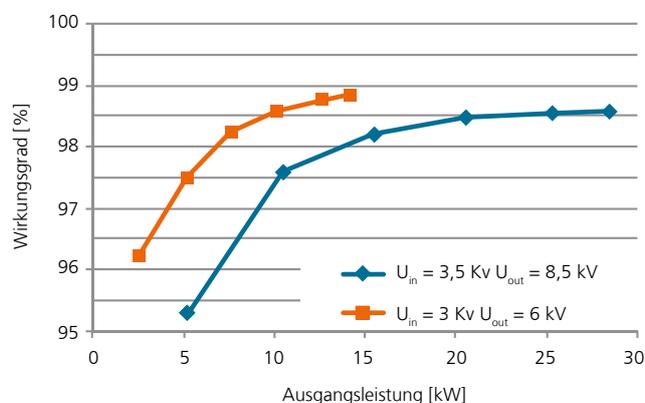
2

HOCHEFFIZIENTE LEISTUNGSELEKTRONIK FÜR DIE MITTELSPANNUNG

Im elektrischen Energieverteilungsnetz kommt der Leistungselektronik eine immer größere Bedeutung zu. Besonders durch den Ausbau der regenerativen Energieerzeugung – wie Photovoltaik und Windkraft – steigt die Zahl der leistungselektronischen Wandler in der Kette zwischen Erzeuger und Verbraucher. Der Einsatz von Hochvolt-Halbleiterbauelementen aus Siliciumkarbid (SiC) macht es möglich, effiziente leistungselektronische Systeme zukünftig direkt an das Mittelspannungsnetz anzubinden. Die Erhöhung der Spannungsebene der Wandler reduziert zum einen die Ströme und die damit verbundenen Kupferquerschnitte, zum anderen kann die Kopplung über einen zusätzlichen 50-Hz-Transformator entfallen.

Bruno Burger, David Chilachava, Dirk Kranzer, **Jürgen Thoma**, Günther Ebert

Halbleiter aus Siliciumkarbid besitzen im Vergleich zu Silicium eine etwa dreimal so große Bandlücke. Daraus resultiert



3 Messungen nach der ersten Inbetriebnahme zeigen einen maximalen Wirkungsgrad von 98,5% bei der Nennleistung von 28 kW. Bei kleinerer Ausgangsspannung und kleinerem Aussteuergrad werden noch höhere Wirkungsgrade erreicht.

1 Teststand zur Bestimmung der Schaltenergien von Mittelspannungstransistoren.

2 Erstes Labormuster des entwickelten Mittelspannungs-Hochsetzstellers mit 10 kV-SiC-Transistoren.

eine sehr hohe Durchschlagfeldstärke, die es ermöglicht, bei gleicher Chip-Dicke Leistungshalbleiterbauelemente mit wesentlich höheren Sperrspannungen herzustellen. Für leistungselektronische Wandler in Mittelspannungsanwendungen sind derartige Bauelemente daher prädestiniert. Mit den ersten verfügbaren Halbleiter-Prototypen werden neue leistungselektronische Lösungen für die Systemtechnik der zukünftigen Energieversorgung und -verteilung entwickelt.

Zum Einsatz kommen neuartige 10 kV-SiC-MOSFETs und intern antiparallelgeschaltete SiC-JBS-Dioden mit einem Nennstrom von jeweils 10 A. Zur Charakterisierung der MOSFETs wurde ein Teststand entwickelt, mit dem die Schaltenergien von Mittelspannungstransistoren ermittelt werden können.

Als leistungselektronischer Wandler wurde ein Hochsetzsteller entwickelt, der eine Eingangsspannung von 3,5 kV auf eine Ausgangsspannung von 8,5 kV anheben kann. Die niedrigen Schaltenergien der SiC-MOSFETs ermöglichen eine sehr hohe Schaltfrequenz von 8 kHz, was etwa dem 10fachen Wert von herkömmlichen Mittelspannungsumrichtern mit Silicium-Halbleitern entspricht. Je höher die Schaltfrequenz, umso kleiner können die passiven Bauelemente dimensioniert werden, was zu einer Reduktion von Material, Volumen und Kosten führt.

Das Projekt wird im Rahmen des internen Programms der Fraunhofer-Gesellschaft »Märkte von Übermorgen« gefördert und soll den Grundstein für weitere Entwicklungen mit Hochvolt-SiC-Transistoren bilden.



WIE REAGIEREN WECHSELRICHTER AUF FEHLER IM STROMNETZ?

Mit dem »Low Voltage Ride Through« Test (LVRT) wird das Verhalten von Wechselrichtern bei Spannungseinbrüchen untersucht. Die Regelbarkeit dieser Stromrichter erlaubt eine dynamische Stützung der Netzspannung. Da die Generatoren konventioneller Kraftwerke sukzessive substituiert werden, müssen auch Wechselrichter Kurzschlussströme einspeisen. Durch Blindstromeinspeisung wird in kritischen Zuständen die Wahrscheinlichkeit eines Blackouts minimiert. Ferner wird die regionale Ausbreitung des Netzfehlers verringert und so die Versorgungsqualität der Verbraucher erhöht. Ohne Netzstützung könnten Schutzelemente des Stromnetzes nicht ordnungsgemäß reagieren.

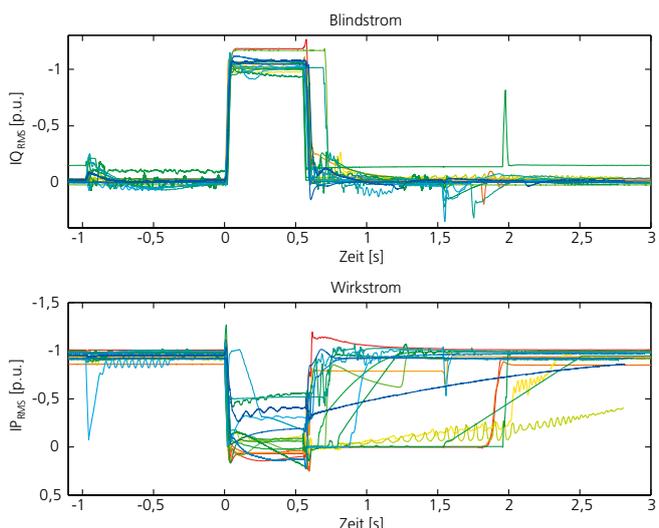
Florian Ackermann, Nicolas Bihler, **Gregor Dötter**, Robin Grab, Sönke Rogalla, **Roland Singer**, Olivier Stalter, Frank Weichelt, Edgar Wolf, Günther Ebert

Im Megawattlabor des Fraunhofer ISE wurde das LVRT-Verhalten von zahlreichen Wechselrichtern untersucht. Dabei lassen sich Parallelen im Verhalten der Prüflinge erkennen. Beispielsweise benutzen Geräte älteren Entwicklungsstands häufig Pulssperren, um Überströme bei dem Fehlereintritt zu verhindern. Sie können dadurch keinen kontinuierlichen Strom einspeisen und regeln den geforderten Blindstrom häufig langsamer ein. Nach Fehlerklärung ist die Netzspannung – bedingt durch die Inrush-Ströme des Einspeisetransformators – stark verzerrt. Viele Prüflinge steigern deshalb nach dem Fehler ihre Leistung nur sehr langsam. Hier und bei den häufigeren, zweipoligen Fehlern enthalten die Richtlinien nicht die für die Versorgungssicherheit erforderlichen Maßnahmen, sondern nur eine Minimalanforderung.

Ergänzend zu den Laborversuchen einzelner Prüflinge wird in Feldtests das Verhalten von großen Solarparks während Netzfehlern untersucht. Im Zusammenspiel der Wechselrichter

1 Feldversuch mit LVRT-Testcontainer im 5 MW Testfeld Dürbheim zur Untersuchung der dynamischen Netzstützung.

mit den netzseitigen Betriebsmitteln (Mittelspannungskabel und Transformatoren) und dem Netzanschlusspunkt können unerwartete Resonanzen auftreten. Sie können zu Abschaltungen führen und stellen hohe Anforderungen an die Regelung der Wechselrichter. Ferner liefern die Feldversuche wertvolle Hinweise zum Verhalten von Wechselrichtern an schwachen, meist ländlichen Netzen und zur Überlagerung von Oberschwingungen. Diese – für die bessere Netzintegration erforderlichen – Daten können mit einem GPS-synchronisierten Messsystem hochgenau erfasst werden. Sie dienen auch zur Bestätigung und Verbesserung der Labortests.



2 Vergleich der Blind- (oben) und Wirkstromeinspeisung (unten) verschiedener Wechselrichter während eines dreiphasigen Spannungseinbruchs auf 25% Restspannung ($t = 0-0,5$ s). Die Wechselrichter zeigen ein sehr ähnliches Verhalten bezüglich des Blindstroms. Problematisch ist, dass die Geräte den Wirkstrom nach dem Fehler nur langsam steigern.

EMISSIONSFREIE MOBILITÄT



Die von der deutschen Bundesregierung beschlossene Energiewende widmet dem Verkehrssektor besondere Aufmerksamkeit, es wurden erhebliche Forschungsmittel für die Elektromobilität freigegeben. Diese umfasst alle Fahrzeuge mit elektrischen Antrieben, unabhängig davon, ob die Antriebsenergie alleine aus einer Batterie, einer Brennstoffzelle oder einer Batterie mit einem Verbrennungsmotor zur Reichweitenverlängerung bezogen wird.

In unserem Geschäftsfeld Emissionsfreie Mobilität bieten wir Forschungsdienstleistung zur Bereitstellung der Antriebsenergie sowie zur Infrastruktur an. Unsere Forschung umfasst:

- Batteriesysteme und Batteriemangement
- Ladeinfrastruktur und Netzanbindung
- Brennstoffzellen
- Wasserstoffinfrastruktur
- Leistungselektronik
- Katalysatoren für die Abgasnachbehandlung
- Inermotorische Emissionsreduktion
- Wärmemanagement
- Produktionstechnik
- Konzept- und Nutzerakzeptanzstudien

Im Bereich der Traktionsbatterien entwickeln wir für Lithium-Technologien Module und Systeme mit den notwendigen Sicherheitskonzepten und Batteriemangementsystemen. Dazu gehört die thermische, elektrische und elektrochemische Modellierung von der Zelle bis zum System inklusive Alterungsmodellen und Lebensdauerkostenanalysen. Wir entwickeln intelligente Lade- und Betriebsführungsstrategien, die in Mikrocontroller von Laderegler, Gerätesteuern sowie Batteriemangementsystemen integrierbar sind. Die Fahrzeugbatterien müssen in das Smart Grid derart eingebunden werden, dass den wachsenden Anforderungen aus dem Stromnetz Rechnung getragen wird. Wir entwickeln Hard- und Softwarelösungen für die kommunikative Anbindung von Ladestationen, zur erzeugungsgerechten Ladung und zur Erbringung von Netzdienstleistungen. Wir bieten technologische sowie wirtschaftliche Bewertungen und Simulationen zu Netzfragen an.

Brennstoffzellen-Fahrzeuge ermöglichen eine emissionsfreie Mobilität mit hoher Reichweite und kurzen Betankungszeiten. Wir fördern deren Entwicklung durch Charakterisierung von Einzelzellen, Zellstapeln sowie Systemen. Zudem testen wir Peripherie- und Zellkomponenten unter extremen Klimabedingungen und in Bezug auf ihre elektrochemische Beständigkeit.

Wasserstoff kann emissionsfrei mit regenerativen Stromerzeugern und Elektrolyse erzeugt werden. Dies untersuchen und demonstrieren wir mit unserer solaren Wasserstoff-Tankstelle zusammen mit zwei Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Wir nutzen die solare Wasserstoff-Tankstelle als Forschungsplattform

für urbane Mobilität, Komponententests und ganzheitliche Energiekonzepte. Wir erarbeiten Studien zur Entwicklung der Wasserstoff-Infrastruktur und entwickeln innovative Technologien für die Membranelektrolyse. Dafür stehen uns Teststände für Zellstapel bis 1 MW_{el} zur Verfügung.

Leistungselektronische Wandler sind das Bindeglied zwischen Batterie, Brennstoffzelle, Antriebsstrang und Stromnetz. Wir bieten umfassende Lösungen für leistungselektronische Systeme zur Netzintegration von Elektrofahrzeugen an. Unsere Expertise liegt im Bereich hocheffizienter und kompakter leistungselektronischer Wandler sowie induktiver und konduktiver Ladesysteme.

Der Verbrennungsmotor wird auch in den kommenden Jahren der dominante Antrieb sein. Wir entwickeln und testen daher Katalysatoren zur Abgasreinigung. Unser patentiertes Verfahren zur rückstandsfreien Verdampfung flüssiger Kraftstoffe favorisieren wir für alternative (homogene) Brennverfahren und Abgasnachbehandlungssysteme.

Ein effizientes Wärmemanagement spielt bei Batterien und Brennstoffzellen hinsichtlich ihrer Alterungsbeständigkeit und Betriebssicherheit eine große Rolle. Mit neuen Hochleistungsmaterialien erreichen wir eine effiziente Temperaturkontrolle. Unser Spektrum reicht von der Entwicklung neuer Wärme- und Kältespeichermaterialien, deren Systemintegration bis hin zum Wärmemanagement im Fahrzeug.

Für einen erfolgreichen Wechsel zur emissionsfreien Mobilität erarbeiten wir intermodale Mobilitätskonzepte und bieten Untersuchungen zur Emissionsreduktion von Fahrzeugflotten an. Außerdem führen wir Studien zur Bewertung zukünftiger Mobilitätskonzepte und zur Nutzerakzeptanz durch.

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt 38

Mitarbeiter vollzeitäquivalent 32

Zeitschriften- und Buchbeiträge 9

Vorträge und Konferenzbeiträge 8

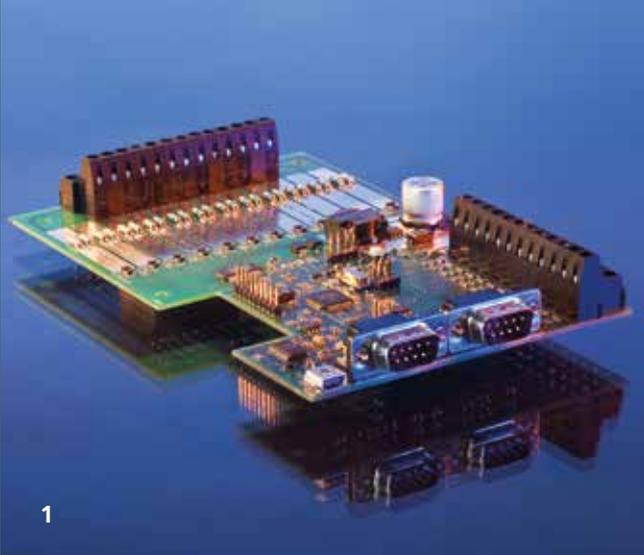
www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/55



Testfahrt mit einem der beiden Brennstoffzellen-Fahrzeuge des Fraunhofer ISE.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination	Dipl.-Ing. Ulf Groos	Telefon +49 761 4588-5202 ulf.groos@ise.fraunhofer.de
Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge	Dipl.-Ing. Stefan Reichert	Telefon +49 761 4588-5476 mobile.powerelectronics@ise.fraunhofer.de
Batteriesysteme für mobile Anwendungen	Dr. Matthias Vetter	Telefon +49 761 4588-5600 mobile.battery@ise.fraunhofer.de
Netzintegration von Elektrofahrzeugen	Dr. Robert Kohrs	Telefon +49 761 4588-5708 mobile.grid@ise.fraunhofer.de
Brennstoffzellen-Mobilität	Dipl.-Ing. Ulf Groos	Telefon +49 761 4588-5202 mobile.fuelcell@ise.fraunhofer.de
Wasserstoffinfrastruktur	Dr. Christopher Hebling	Telefon +49 761 4588-5195 mobile.h2@ise.fraunhofer.de
Wärmemanagement in Fahrzeugen	Dipl.-Biol. Stefan Gschwander	Telefon +49 761 4588-5494 mobile.thermal-mgt@ise.fraunhofer.de



1



2

ENTWICKLUNG VON INNOVATIVEN BATTERIEMANAGEMENTSYSTEMEN

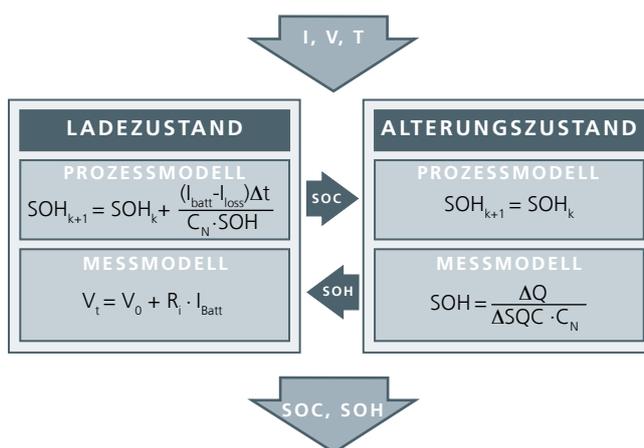
Der zukünftige Markterfolg von Elektrofahrzeugen hängt ganz entscheidend von der Leistungsfähigkeit und der Qualität der verwendeten Fahrzeugbatterien ab. Neben der Konzeption, der Auswahl der Zellen, dem mechanischen Aufbau und der elektrischen Verschaltung liegt die zentrale Aufgabe als Intelligenz des Batteriesystems beim Batteriemanagementsystem. Es übernimmt die Zustandsbestimmung sowie die Sicherheitsfunktionen im Batteriesystem und ist damit maßgeblich für den zuverlässigen und reichweitenoptimierten Betrieb des Fahrzeugs verantwortlich.

Adrian Heuer, Nikolaus Lang, **Stephan Lux**, Peter Raab, Matthias Vetter, Günther Ebert

Batteriemanagementsysteme zur Überwachung und Regelung stellen die zentrale Intelligenz des Batteriesystems dar. Sie verhindern sowohl eine Überladung als auch eine Tiefentladung eines Batteriesystems und dessen Batteriezellen. Eine hochgenaue Spannungsmessung jeder Batteriezelle ist neben der präzisen Messung des Stroms die Basis für eine korrekte Ladezustands- und Alterungsbestimmung des Batteriesystems und der Batteriezellen. Hierzu entwickeln wir stochastische Filterverfahren (beispielsweise den sogenannten Partikelfilter), die es erlauben, den Ladezustand (SOC) sowie den Alterungszustand (SOH) jeder einzelnen Zelle während des Betriebs mit hoher Genauigkeit zu ermitteln (Abb. 3). Eine sinnvolle Architektur besteht bei größeren Systemen aus einem Batteriemangement (BMS, Abb. 1) pro Batteriemodul sowie einem übergeordneten zentralen Batteriemanagementsystem (C-BMS, Abb. 2).

Grundlage für die Algorithmen stellen Batteriemodelle dar, die durch Messungen im Batterielabor parametrisiert und validiert werden. Darüber hinaus werden sie für ein korrektes Cell

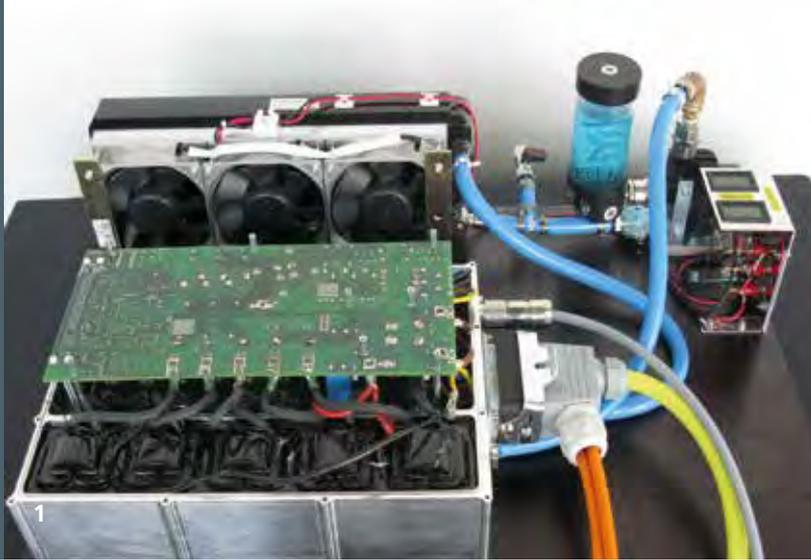
- 1 Batteriemanagementsystem (BMS) für ein Batteriemodul.
- 2 Zentrales Batteriemanagementsystem (C-BMS) für das Batteriesystem.



- 3 Struktur des sogenannten Partikelfilters zur hochgenauen Online-Ermittlung von Lade- und Gesundheitszustand der Batterie.

Balancing genutzt. Das Cell Balancing sorgt auf der Basis der hochgenauen Zustandsbestimmung für einen Ausgleich der einzelnen Zellladungen. Neben der Überwachung der Batterie muss das Batteriemangement auch in der Lage sein, mit externen Steuergeräten zu kommunizieren, entsprechende Parameter der Batterie bereitzustellen und Sollwerte vorzugeben.

Im Rahmen der »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität II« entwickelt das Fraunhofer ISE ein innovatives Batteriemanagementsystem für ein Leichtbauenergiepack, das mit den oben genannten Vorzügen jederzeit einen sicheren und reichweitenoptimierten Betrieb gewährleistet.

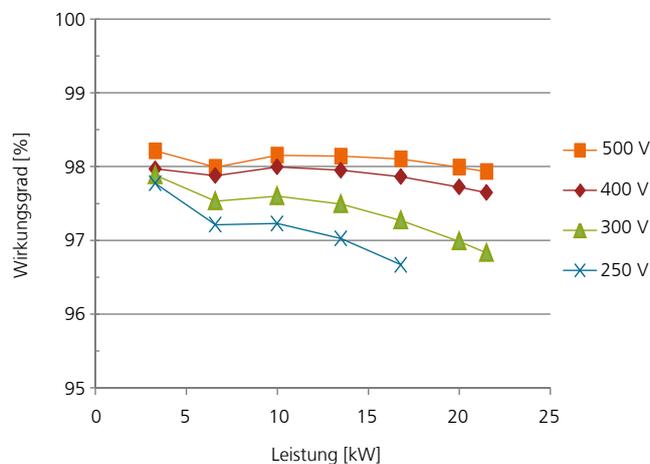


FAHRZEUGBASIERTE NETZÜBERWACHUNG UND NETZSTABILISIERUNG

Die Menge der Elektrofahrzeuge wird in den nächsten Jahren stark steigen. Mit höheren Batteriekapazitäten wird zudem der Bedarf an Ladegeräten mit hoher Leistung zunehmen. Bei gleichzeitigen Ladevorgängen kann es besonders in schwächeren Verteilnetzen zu einer kritischen Netzbelastung kommen. Am Fraunhofer ISE werden die Möglichkeiten von fahrzeuggestützten, netzstützenden Maßnahmen untersucht. Im Projekt »iZEUS« wurden hierfür ein blindleistungsfähiges, bidirektionales »onboard«-Ladegerät sowie ein in Fahrzeuge einbaubares Steuergerät zur präzisen Messung des aktuellen Netzzustands entwickelt. Unterschiedliche Regelstrategien werden untersucht und bewertet.

Jan Clement, Kilian Dallmer-Zerbe, Benriah Goeldi, **Robert Kohrs**, Michael Mierau, **Stefan Reichert**, Stefan Schönberger, Günther Ebert

Eine intelligente Netzintegration von Elektrofahrzeugen, d. h. eine Steuerung der Ladevorgänge beispielsweise über



2 Wirkungsgrad des bidirektionalen Ladegeräts über den gesamten Leistungsbereich und für verschiedene Batteriespannungen.

1 Konduktives Ladegerät mit Wasserkühlung und Rückkühler. Das Ladegerät ist in einem Gehäuse integriert und bereit zum Einbau in ein Elektrofahrzeug.

flexible Tarife, ist aus vielen Gründen sinnvoll und wichtig: um Ladevorgänge an die Verfügbarkeit erneuerbarer Energien anzupassen, Leistungsspitzen zu vermeiden oder die Batterie schonend zu betreiben. Kritische Netzsituationen werden räumlich und zeitlich begrenzt auftreten. Die direkte Regelung im Fahrzeug bietet daher Vorteile. In einer umfangreichen Studie wurden mögliche System- und Regelungskonzepte mit modellbasierten Netzsimulationen untersucht.

Das am Fraunhofer ISE entwickelte Ladegerät ist in der Lage, Wirk- und Blindleistung mit dem Netz auszutauschen. Aufgrund der Schaltungstopologie kann die Wirkleistung vom Netz bezogen, aber auch ins Netz zurückgespeist werden. Außerdem lassen sich induktive sowie kapazitive Blindleistung mit dem Netz austauschen. Dadurch können verschiedenste Systemdienstleistungen wie die Frequenz- und Spannungshaltung angeboten werden.

Aufgrund der Schaltungstopologie ohne Transformator und dem Einsatz neuer Halbleiter aus Siliciumkarbid konnte der maximale Wirkungsgrad auf über 98% erhöht werden (Abb. 2). Das macht besonders die Zwischenspeicherung erneuerbarer Energien interessant. Auch die Leistungsdichte konnte gegenüber vergleichbaren Geräten gesteigert werden. Ladegerät und Grid Controller wurden im Labor bereits erfolgreich in Betrieb genommen und können nun in ein Fahrzeug integriert werden (Abb. 1).

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.

www.izeus.de



WASSERSTOFF-INFRASTRUKTUR FÜR EINE NACHHALTIGE MOBILITÄT

Momentan ist der deutsche Mobilitätssektor fast ausschließlich durch konventionelle Antriebstechnologien geprägt. Demgegenüber stellt Wasserstoff als Kraftstoff in Brennstoffzellen-Fahrzeugen eine hervorragende Ergänzung zu batteriebetriebenen Antrieben dar und ist damit essentiell, um Treibhausgasemissionen im Verkehrssektor zu senken. Das Umweltministerium Baden-Württemberg hat daher beim Fraunhofer ISE eine Studie in Auftrag gegeben, die den Status Quo und den Handlungsbedarf bezüglich der mobilitätsbezogenen Wasserstoffinfrastruktur betrachtet, eine Roadmap für eine H₂-Infrastruktur bis 2030 entwickelt und basierend auf diesen Erkenntnissen Handlungsempfehlungen formuliert. Die wichtigsten Ergebnisse der Studie »Wasserstoff-Infrastruktur für eine nachhaltige Mobilität« werden im Folgenden vorgestellt.

Tom Smolinka, **Christopher Voglstätter**, Christopher Hebling

Durch vielfältige Aktivitäten wie der »Clean Energy Partnership (CEP)« und »H₂Mobility« ist Deutschland im Bereich der Wasserstoffmobilität auf dem Weg, sich international als Leitmarkt zu etablieren. So hat sich die Industrie im Oktober 2013 erneut dazu bekannt, die Anzahl der öffentlichen Tankstellen von heute 15 bis zum Jahr 2017 auf 100 und auf 400 bis zum Jahr 2023 zu erweitern.

Zum Aufbau einer Wasserstoffinfrastruktur in Baden-Württemberg wurde die Marktdurchdringung von Wasserstoff im Verkehrssektor quantifiziert sowie Wasserstoffbedarf, Anzahl benötigter Tankstellen und deren Größe bis zum Jahr 2030 abgeleitet. Für 2030 werden in Baden-Württemberg bis zu 330 Tankstellen und ein Wasserstoffumsatz von 50.000 Tonnen pro Jahr erwartet.

1 Solare Wasserstoff-Tankstelle am Fraunhofer ISE.

2 Die Studie mit einem Umfang von 96 Seiten wurde am 26. März 2013 von den baden-württembergischen Ministerien für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, für Finanzen und Wirtschaft, für Verkehr und Infrastruktur sowie der e-mobil BW GmbH herausgegeben. Sie ist bei der e-mobil BW frei als Download erhältlich unter: www.e-mobilbw.de



Die Herausforderungen bei der Errichtung einer Wasserstoffinfrastruktur sind Kosten, Zuverlässigkeit, Abnahme / Prüfung und Genehmigungsverfahren der Tankstellen, die (Weiter-)Entwicklung von Komponenten sowie die heute noch fehlende Nachfrage nach Wasserstoff. Auf dieser Basis wurden vier übergeordnete Leitgedanken formuliert:

- Wasserstoff als Energieträger kann einen wichtigen Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele leisten und einen Ausbau der erneuerbaren Energien fördern.
- Zur Senkung des Investitionsrisikos und zur Marktvorbereitung wird auch weiterhin ein Engagement der öffentlichen Hand notwendig sein.
- Standardisierung erleichtert den Aufbau einer H₂-Tankstelleninfrastruktur.
- Zur Erreichung einer marktreifen Infrastruktur sind weitere Aktivitäten der beteiligten Akteure notwendig.

SPEICHERTECHNOLOGIEN



Der Umbau unserer Energieversorgung von überwiegend fossilen auf vermehrt erneuerbare Energien stellt uns vor große Herausforderungen, nicht zuletzt dadurch, dass der größte Teil der Quellen für erneuerbare Energien starken zeitlichen Schwankungen unterliegt, die nicht steuerbar und nur begrenzt vorhersagbar sind. Daraus ergibt sich eine zentrale Rolle für Energiespeicher: Nur wenn es gelingt, effiziente und kostengünstige Energiespeicher zu entwickeln, ist eine stabile Energieversorgung durch erneuerbare Energien möglich. Dabei ist es wesentlich, die komplette Kette der Energieversorgung zu betrachten und zu entscheiden, in welcher Form die Energie gespeichert werden soll, um den letztendlich benötigten Bedarf in Form von Strom, Wärme, Kälte oder Antriebsenergie optimal bereitzustellen.

Das Fraunhofer ISE ist seit vielen Jahren auf verschiedenen Forschungsgebieten der Energiespeichertechnologien tätig:

- elektrochemische Speicher: von Blei-Säure- über Lithium-Ionen- bis zu Redox-Flow-Batterien
- stoffliche Speicher: Speichersysteme auf Basis von Wasserstoff bzw. Methanol
- thermische Speicher: von Kältespeichern über Wärmespeicher für Gebäude bis zu Hochtemperaturspeichern für Kraftwerke

Im Bereich der elektrochemischen Speicher entwickeln wir für Blei-Säure-Batterien und verschiedenste Lithium-Technologien Module und Systemlösungen mit den notwendigen Sicherheitskonzepten und Batteriemanagementsystemen. Diese Aktivitäten werden durch die thermische, elektrische und elektrochemische Modellierung von der Zelle bis zum System inklusive Alterungsmodellen sowie Systemsimulation und Lebensdauerkostenanalysen unterstützt. Wir entwickeln intelligente Lade- und Betriebsführungsstrategien, die problemlos in Mikrocontroller von Laderegler, Gerätesteuern sowie Batteriemanagementsystemen integrierbar sind. Für Redox-Flow-Batterien arbeiten wir an der Stack- und Systementwicklung sowie dem Batteriemangement mittels simulationsgestützter Analyse und Auslegung.

Stoffliche Speicher können elektrochemische Speicher ideal zur Speicherung erneuerbarer Energie ergänzen. Am Fraunhofer ISE konzentrieren wir uns auf die elektrochemische Wasserstofferzeugung durch die Membranelektrolyse als zentrales Kernelement für stoffliche Speicher in Kopplung mit erneuerbaren Energien. Vor allem die Lebensdaueranalyse und die Optimierung der Betriebsführung von Elektrolysezellen und -systemen stehen im aktuellen Fokus unserer Arbeiten. Die multiphysikalische Modellierung der Prozesse in einer Elektrolysezelle ist dabei ein wichtiges Werkzeug und unterstützt uns in der Auslegung von Zellstapeln und kompletten Systemen.

Durch die Entwicklung von beschleunigten Alterungstests auf Material- und Komponentenebene sollen schneller Aussagen zur Dauerhaltbarkeit von Elektrolyseuren getroffen werden können.

Thermische Speicher in der Solarthermie dienen dazu, Schwankungen des solaren Ertrags auszugleichen. Damit kann der Bedarf an Wärme und Kälte weitgehend unabhängig von der aktuellen Solarstrahlung gedeckt werden. Wärmespeicher bis 95 °C werden überwiegend in Form von Wasserspeichern realisiert. Wir vermessen, bewerten und optimieren solche Speicher als Komponente und im System. Ziel ist dabei, die Energieeffizienz zu steigern und Kosten zu senken.

Wenn zur thermischen Speicherung nur geringe Temperaturdifferenzen zur Verfügung stehen, bieten Latentwärmespeicher deutlich höhere Speicherkapazitäten als konventionelle Wärmespeicher. Wir entwickeln und charakterisieren Latentwärmespeichermaterialien sowie Speichersysteme in einem Temperaturbereich von -30 °C bis +300 °C. Simulationen dienen hierbei der optimalen Auslegung sowohl der Materialien als auch der Speichersysteme. Insbesondere für den stark an Bedeutung gewinnenden Markt der Kältespeicher versprechen Latentwärmespeicher eine hohe Kompaktheit und Effizienz.

Die Integration von Hochtemperaturspeichern in solarthermischen Kraftwerken ermöglicht eine zeitlich bedarfsorientierte Stromerzeugung. Als Speichermedium wird meist Salzschnmelze eingesetzt. Für diese Anwendung entwickeln, vermessen, bewerten und optimieren wir Speicherkonzepte, die für Temperaturen von 200 °C bis 600 °C ausgelegt sind.





Die vier Oxidationszustände des verdünnten Vanadium-Elektrolyts
(v. li. n. r.: V5+, V2+, V4+, V3+).

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr.-Ing. Peter Schossig

Telefon +49 761 4588-5130
storage@ise.fraunhofer.de

Dr. Günther Ebert

Telefon +49 761 4588-5229
storage@ise.fraunhofer.de

Batteriesysteme

Dr. Matthias Vetter

Telefon +49 761 4588-5600
storage.battery@ise.fraunhofer.de

Redox-Flow-Batterien

Dr. Tom Smolinka

Telefon +49 761 4588-5212
storage.flowbattery@ise.fraunhofer.de

Latentwärmespeicher

Dr.-Ing. Peter Schossig

Telefon +49 761 4588-5130
storage.latent@ise.fraunhofer.de

Kältespeicher

Dipl.-Biol. Stefan Gschwander

Telefon +49 761 4588-5494
storage.cold@ise.fraunhofer.de

Speicher für Niedertemperatur-Solarthermie

Dr.-Ing. Wolfgang Kramer

Telefon +49 761 4588-5096
storage.lowtemp@ise.fraunhofer.de

Hochtemperaturspeicher

Dr. Werner Platzer

Telefon +49 761 4588-5983
storage.hightemp@ise.fraunhofer.de

Membranelektrolyseure und Wasserstoffspeichersysteme

Dr. Tom Smolinka

Telefon +49 761 4588-5212
storage.hydrogen@ise.fraunhofer.de

SYSTEM



BATTERIEMANAGEMENT



MODULE

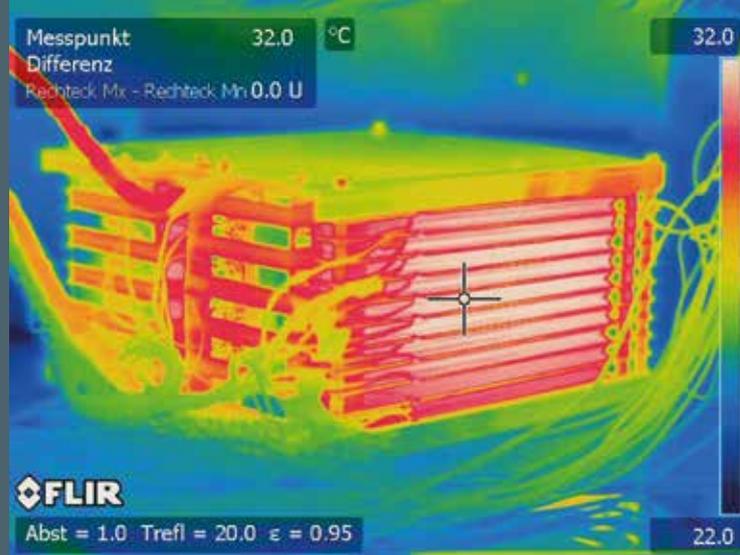


ZELLEN



1

2



HAUSBATTERIESYSTEM ZUR ZWISCHENSPEICHERUNG VON PV-STROM

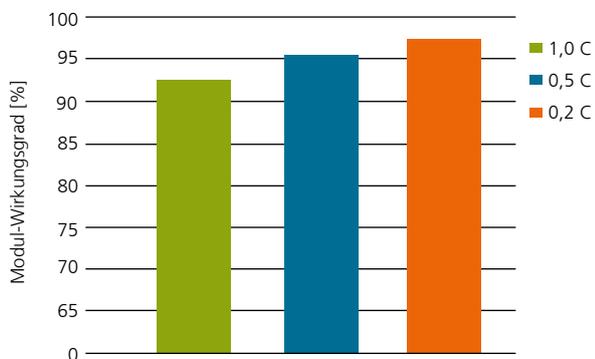
Dezentrale Batteriesysteme zur Zwischenspeicherung von PV-Strom sind eine wesentliche Säule für den weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien. Integriert in Gebäude müssen diese Speicherlösungen hocheffizient, sicher, zuverlässig und langlebig sein. Zudem müssen sie leicht mit bestehenden und neu zu installierenden PV-Anlagen kombiniert werden können. Um diese Anforderungen zu erfüllen, entwickeln wir im Rahmen des Fraunhofer Projekts »Der hybride Stadtspeicher« innovative Batteriesysteme auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie. Sie zeichnen sich besonders durch ihre Modularität, ein ausgeklügeltes Kühlsystem und ein intelligentes Batteriemangement mit präzisen Algorithmen zur Zustandsbestimmung aus.

Martin Dennenmoser, Nikolaus Lang, Stephan Lux, Peter Raab, **Matthias Vetter**, Günther Ebert

Lithium-Ionen-Batterien eignen sich aufgrund ihrer spezifischen Charakteristika ideal für die Zwischenspeicherung von PV-Strom. Um aus Einzelzellen ein funktionstüchtiges Batteriesystem zu bauen, ist allerdings eine Reihe von aufwendigen Entwicklungsschritten notwendig. Die Zellen werden zu sogenannten Batteriemodulen verschaltet (Abb. 1). Sie müssen abhängig vom Betriebspunkt aktiv gekühlt werden, leicht in ein Batteriesystem integrierbar sein sowie von einem Batteriemangement überwacht werden.

Bei der Konstruktion der Batteriemodule liegt das Hauptaugenmerk auf einer möglichst homogenen Temperaturverteilung und einer Systemlösung, die über einen weiten Betriebsbereich nicht auf das integrierte Kühlsystem zurückgreifen muss (Abb. 2), ohne dabei eine vorzeitige Alterung der Zellen und sicherheitskritische Zustände zu bewirken. Dadurch lassen sich periphere Verluste, z. B. durch die Lüfter, reduzieren und damit die Systemwirkungsgrade sowie die Lebensdauer erhöhen.

- 1 Aufbau eines modularen Lithium-Ionen-Batteriesystems zur Zwischenspeicherung von PV-Strom. Die einzelnen Zellen werden seriell zu Modulen verschaltet und in ein Batteriesystem zusammen mit dem zentralen Batteriemangement integriert, das die Schnittstelle zu peripheren Komponenten wie dem Wechselrichter bildet.
- 2 Wärmebildkamera-Aufnahme des Lithium-Ionen-Batteriemoduls während der Entladephase mit einer C-Rate von 1 (einstündige Entladung) ohne aktivierte Kühlung. Nach 18 Minuten ist die Temperatur am heißesten Punkt auf nur 32 °C angestiegen.

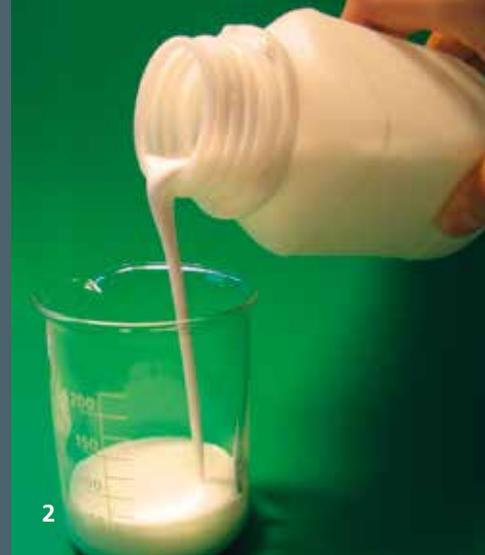


- 3 Wirkungsgrade des Lithium-Ionen-Batteriemoduls bei verschiedenen C-Raten (einstündige, zweistündige und fünfstündige Ladung / Entladung).

Das Batteriemangement ist so angelegt, dass mehrere Module von einer Einheit überwacht und geregelt werden. Lediglich für das sogenannte Cell Balancing ist pro Modul eine separate Platine vorgesehen, die intelligent in den Strömungskanal der Lüftung integriert ist. Damit reduziert sich der erforderliche Hardwareaufwand gegenüber Systemen mit integriertem Modulmanagement. Auf Systemebene lassen sich so Kostensenkungspotenziale erschließen.



1

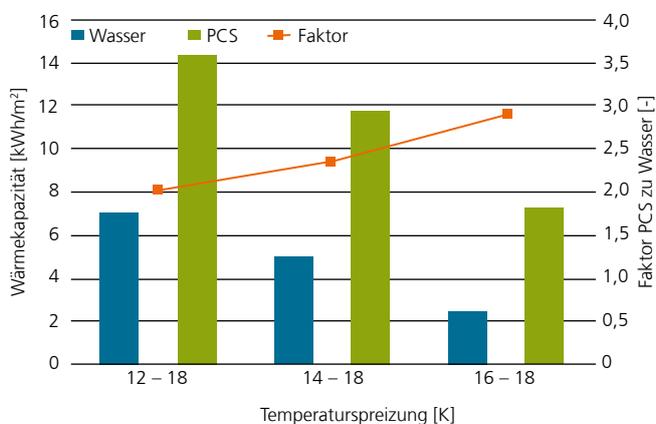


2

PHASENWECHSELFLÜSSIGKEITEN ALS KÄLTESPEICHER FÜR WÄRMEPUMPENSYSTEME

Phasenwechselfluide (Phase Change Slurries, PCS) sind eine Dispersion aus einem Phasenwechselmaterial (PCM) und Wasser. Sie bieten bei kleinen Temperaturspreizungen deutlich höhere Speicherdichten als Wasser allein. Damit eignen sie sich besonders zur kompakten Speicherung von Kälte für die Kühlung von Gebäuden und technischen Systemen. Sie ermöglichen die Integration von Speichern auch dort, wo nicht ausreichend Platz für konventionelle Kältespeicher vorhanden ist. In Systemen mit Kompressionskältemaschinen (KM) kann mit ihnen die Kälteerzeugung vom Kältebedarf entkoppelt werden. Solche Systeme können dann nach Nutzerbedarf gesteuert werden und flexibel auf Anforderungen des elektrischen Netzes reagieren.

Stefan Gschwander, Jan Rudolph, Peter Schossig, Laura Vorbeck, Hans-Martin Henning



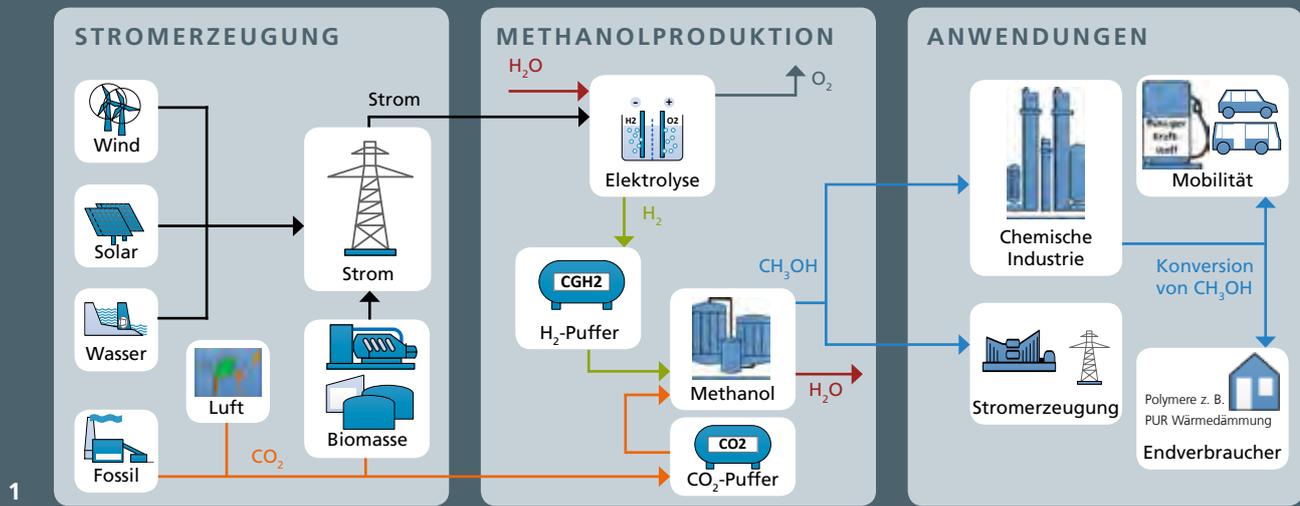
3 Das PCS bietet eine deutlich höhere Speicherdichte als Wasser. Dadurch können, bei gleicher Wärmekapazität, Speicher kleiner dimensioniert werden. Je kleiner die nutzbare Temperaturspreizung wird, desto größer wird der Vorteil gegenüber Wasser.

1+2 Das eingesetzte PCS ist eine Dispersion aus PCM und Wasser. Es ist unabhängig vom Phasenzustand des PCM flüssig und kann wie jede andere Flüssigkeit durch ein hydraulisches Netz gepumpt werden.

Im Projekt »MESSIB« (Multi Energy Storage Systems in Buildings) haben wir zusammen mit der BASF AG und weiteren Partnern PCS mit einer Schmelztemperatur zwischen 14 und 18 °C entwickelt. In diesem Temperaturbereich besitzt das PCS die 2,4fache Speicherdichte von Wasser. Dieses Material wurde im Solarhaus Freiburg zur Speicherung von Kälte genutzt. Das System besteht aus einer Erdsonde – als Wärmesenke und -quelle – einer reversiblen Wärmepumpe, einem 1000 l Pufferspeicher sowie Kühldecken, die ohne weiteren Zwischenkreis aus dem Speicher versorgt werden. Das PCS wurde über einen Plattenwärmeübertrager mit der reversiblen Wärmepumpe abgekühlt, gespeichert und tagsüber zur Kühlung von zwei Büroräumen genutzt. Die Wärmepumpe kann hierbei direkt aus dem Netz oder über ein eigenes PV-System versorgt werden. Damit besteht die Möglichkeit, auch den selbst erzeugten Strom im Sommer in Form von Kälte zu speichern, um diese dann zeitversetzt zu nutzen.

Mit diesem System konnte die Anwendbarkeit von PCS als Kältespeicher- und Verteilungsmedium überprüft und bestätigt werden. Für einen energetisch optimierten und sicheren Betrieb ist eine geringe Viskosität wichtig, um einen geringen Energiebedarf für die Förderung des Mediums und eine gute Leistung der Wärmeübertrager und Kühldecken zu gewährleisten. Die quasi isotherme Wärmeab- und -aufnahme der PCS wirkt sich zusätzlich positiv auf die Leistung aus.

Unser Ziel ist, in Zukunft die PCS weiter zu optimieren, um in weiteren Anwendungen im Gebäude- und Industriebereich die Potenziale dieser Speicherflüssigkeiten zu demonstrieren. Das Projekt wurde durch die Europäische Union (EU) unterstützt.



CHEMISCHER SPEICHER: KONVERSION VON CO_2 UND H_2 ZU METHANOL

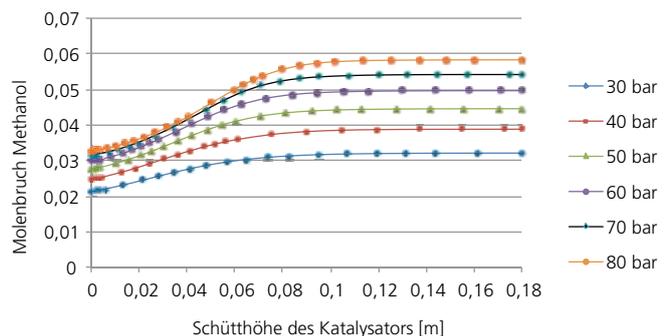
In Anbetracht des steigenden Anteils von Wind- und Solarstrom wird es notwendig, elektrische Energie auch saisonal und in großem Maßstab zu speichern. Der von uns verfolgte Power-to-Liquid-Ansatz zielt darauf, durch die Elektrolyse von Wasser aus nachhaltigen Energiequellen große Mengen Wasserstoff herzustellen, der durch Reaktion mit Kohlendioxid in Methanol umgewandelt wird. Die Flüssigkeit Methanol lässt sich hervorragend speichern und transportieren. Am Fraunhofer ISE wurde eine sehr kompakte Laboranlage konzipiert und aufgebaut, die der Prozessoptimierung und der Auslegung einer industriellen Anlage bei der Solvay Fluor GmbH dient.

Thomas Aicher, Markus Jorgas, **Achim Schadt**, Vitalis Weiß, Christopher Hebling

Methanol ist einer der wichtigsten Grundstoffe der chemischen Industrie. Weltweit werden jährlich etwa 60 Mio. Tonnen (2012) produziert. Ungefähr 85% davon werden als Ausgangsstoff für Synthesen oder als Lösungsmittel eingesetzt. Der Rest kommt im Energiesektor als Kraftstoff bzw. Kraftstoffadditiv zum Einsatz. Fossiles Erdgas ist derzeit die nahezu einzige Kohlenstoffquelle für die Methanolproduktion. Dadurch werden große Mengen Treibhausgase freigesetzt. Diese Emissionen können signifikant verringert werden, wenn Kohlendioxid – idealerweise aus biogenen Prozessen – mit regenerativ erzeugtem Wasserstoff zu Methanol umgewandelt wird, wie unsere Ökobilanz-Rechnungen ergeben haben.

Zur Auslegung und zum besseren Verständnis unserer zweistufigen Anlage wurden vor den experimentellen Tests Prozesssimulationen auf Basis des Steady-State-Kinetik-Modells von Bussche und Froment durchgeführt. Da die Methanolsynthese ein exothermer Prozess ist, sind geringe Temperaturen thermodynamisch günstig. Allerdings sind die

1 Dargestellt ist die gesamte Prozesskette von der Erzeugung erneuerbaren Stroms über die Methanolherstellung bis zu dessen Einsatz in den unterschiedlichen Märkten. Besonders interessant ist die Umwandlung zu flüssigem Kraftstoff, der für manche mobile Anwendungen unverzichtbar bleiben wird, und die damit verbundene Möglichkeit, auch dort große Mengen CO_2 einzusparen.



2 Ergebnisse der Bussche-Froment-Simulation von einem der beiden Reaktoren. Da der Methanolsynthese eine volumenvermindernde Reaktion zugrunde liegt, erhöht sich der Methanolanteil mit steigendem Druck. Die Simulation zeigt ferner, dass bereits nach einer Katalysatorschütthöhe von ca. 0,1 m die Gleichgewichtskonzentration erreicht ist und die zweite Reaktorhälfte keinen Umsatz beisteuert (und daher weggelassen werden könnte).

derzeit verwendeten Katalysatoren erst ab Temperaturen von typischerweise 250 °C ausreichend aktiv. Ein wichtiges Projektziel ist es deshalb, aktivere Katalysatoren zu verwenden, die den Einsatz bei geringeren Temperaturen erlauben. Derzeit wird am Fraunhofer ISE zunächst ein konventioneller Cu/ZnO-Katalysator getestet, um die Anlage in Betrieb zu nehmen und ein geeignetes Referenzsystem zu etablieren.

Das Projekt wird von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) unterstützt.



ENTWICKLUNG UND OPTIMIERUNG VON REDOX-FLOW-BATTERIEN

Zur Entwicklung eines skalierbaren Stromspeichers mit einer elektrischen Leistung von $100 \text{ kW}_{\text{el}}$ und einer Kapazität von $1 \text{ MWh}_{\text{el}}$ beschäftigen wir uns am Fraunhofer ISE mit der Stack- und Systementwicklung sowie mit dem Management von Redox-Flow-Batterien. Durch die simulationsgestützte Analyse und Auslegung von Redox-Flow-Batterien identifizieren wir Optimierungspotenziale auf Zell- und Stackebene und nutzen sie für die Weiterentwicklung des Designs. Im Rahmen des Projekts »1 MWh Redox-Flow Netzspeicher« haben wir einen optimierten Zellstapel mit einer Leistung von 5 kW_{el} für die Anwendung in Inselsystemen oder netzgekoppelten Speichersystemen entwickelt. Auf Stack-Ebene werden Zyklen-Wirkungsgrade von über 80% erreicht. Die aktuellen Forschungsarbeiten konzentrieren sich auf die weitere Erhöhung der Leistungs- und Energiedichte sowie die Reduktion der Herstellungskosten eines 5 kW_{el} Zellstapels.

Kolja Bromberger, Martin Dennemoser, Malte Schlüter, Tom Smolinka, Matthias Vetter, Christopher Hebling

Mittels multiphysikalischer Modellierung werden grundlegende Fragestellungen zur Optimierung auf Zellebene beantwortet. Hierdurch können wir ein tieferes Verständnis für die ablaufenden Prozesse und die Verlustmechanismen entwickeln. Gezielte in-situ Messungen an Einzelzellen und ex-situ Messungen an Elektrode, Membran und Elektrolyt ermöglichen die Charakterisierung von Lade- und Entladevorgängen sowie die Erhebung von Stoffparametern als essentielle Datengrundlage für Modellierungs- und Simulationsarbeiten. Für die experimentellen Arbeiten an Einzelzellen wurde ein vollautomatisierter Teststand mit detaillierten Testprotokollen entwickelt. Er steht für umfassende Materialcharakterisierungen zur Verfügung.

1 Erprobung eines neuen Stack-Designs für eine 5 kW_{el} Redox-Flow-Batterie mit 40 Zellen und einer Zellfläche von 2000 cm^2 . Eine vollautomatisierte Testfeldanlage bis $10 \text{ kW}_{\text{el}}$ wurde hierfür aufgebaut, in Betrieb genommen und steht für Vergleichs- und Langzeitmessungen zur Verfügung. In unserem neuen Entwicklungszentrum entsteht aktuell ein Testfeld zur Untersuchung von Zellstapeln bis $35 \text{ kW}_{\text{el}}$ sowie von Multi-Stack-Konfigurationen bis $52 \text{ kW}_{\text{el}}$.

2013 konnte die Entwicklung und der Probetrieb eines 5 kW_{el} Zellstapels erfolgreich abgeschlossen werden. Diese Leistungsklasse eignet sich sehr gut, um systemrelevante Prozessparameter zu untersuchen und zu optimieren. Basierend auf den Erfahrungen dieser Entwicklungsarbeiten optimieren wir das Stack-Design weiter und verfolgen alternative Zellkonzepte zur Steigerung der Leistungsdichten und Reduktion der Herstellungskosten.

Aufgrund der aussichtsreichen Ergebnisse der Entwicklungsarbeiten auf Material-, Stack- und Systemebene wurde ein Redox-Flow-Batteriesystem mit Netzkoppelung mit einer Leistung von 5 kW_{el} und 20 kWh aufgebaut und in Betrieb genommen. Aktuell werden Betriebsdaten in einem Feldtest erfasst und ausgewertet.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.



AKTIVE LATENTWÄRMESPEICHER IN SOLAR-THERMISCHEN KRAFTWERKEN

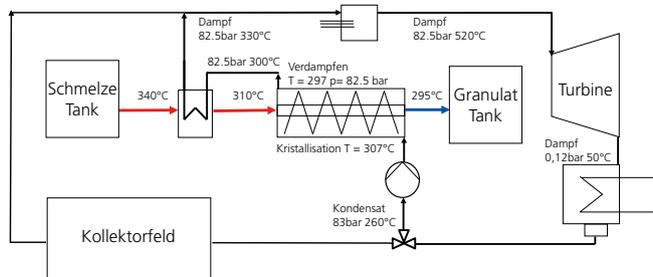
Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung eines Latentwärmespeichers für direktverdampfende (DV) solarthermische Kraftwerke. Der Speicher wird mit solar erzeugtem Dampf beladen, um in Zeiträumen ohne Einstrahlung Dampf zur Verfügung zu stellen. Es ist exergetisch vorteilhaft, die bei Kondensation bereitgestellte Wärme in einem Phasenwechsel (fest / flüssig) zu speichern, da hier die Speicherung nahezu isotherm erfolgt. Dafür wurde ein neuartiges Konzept entwickelt. Ein Schneckenwärmeübertrager transportiert nach dem Prinzip einer archimedischen Schraube das Speichermedium (Nitratsalz) und führt simultan Wärme zu (Schmelzen des Phasenwechselmaterials) oder ab (Kristallisieren). Dieses Speichersystem wird modelliert und anschließend in einem 50 MW-Kraftwerk mit DV-Fresnelkollektoren in Systemsimulationen untersucht und optimiert.

Anton Neuhäuser, Verena Zipf, Werner Platzer

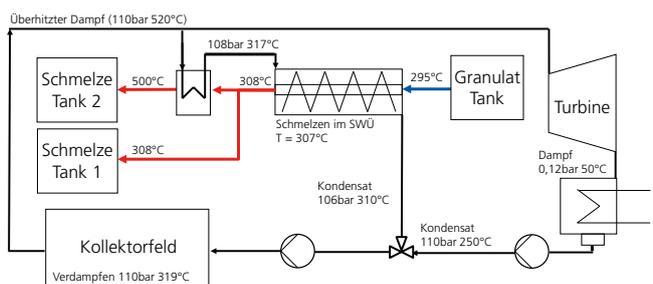
In Systemsimulationen wird der Einsatz des Latentwärmespeichers in einem 50 MW Referenzkraftwerk bewertet. Hierzu wird ein Modell des Schneckenwärmeübertragers (SWÜ) in »ColSim«, einer am Fraunhofer ISE entwickelten Simulationsumgebung, erstellt. Es werden verschiedene Systemkonzepte (2-Tank- oder 3-Tank-Speicher) aufgebaut (siehe Abb. 3 und Abb. 4) und passende Betriebskonzepte erarbeitet. Um eine abschließende Bewertung zu ermöglichen, werden anhand der Ergebnisse der Jahresdauerrechnung und Kostennahmen die Stromgestehungskosten berechnet. Um das wirtschaftliche Potenzial zu erhöhen, wird ein Optimierungsalgorithmus eingesetzt, der Systemparameter (z. B. Solarfeldgröße, Massenströme) variiert, um die Stromgestehungskosten zu minimieren.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.

- 1 Teststand zur Untersuchung eines neuartigen Latentspeicherkonzepts: Prototyp mit 5 kW Wärmeleistung und Schneckenwärmeübertrager mit zwei ineinander kämmenden Wellen.
- 2 Kristallisation von Nitratsalzschnmelze im Schneckenwärmeübertrager: Das kristalline Salz wird direkt abgeschabt und zerkleinert.



- 3 Nachtbetrieb eines 50 MW direktverdampfenden Kraftwerks mit Zwei-Tank-Speicher und zusätzlich installiertem fossilem Zusatzbrenner beim Entladen des Speichers.



- 4 Tagbetrieb eines 50 MW direktverdampfenden Kraftwerks mit Drei-Tank-Speicher beim Beladen.

ENERGIESYSTEMANALYSE



Die erneuerbaren Energietechnologien haben sich in den vergangenen Jahren rasant entwickelt: Die Preise sind stark gefallen, gleichzeitig ist die installierte Leistung stark gestiegen. In Ländern wie Deutschland, Italien und Spanien tragen sie bereits einen erheblichen Anteil zur Stromversorgung bei. Andere Länder, beispielsweise in Nordafrika und Asien, setzen sich derzeit ehrgeizige Ziele für den Ausbau der erneuerbaren Energien. Die Motivationen hierzu sind vielfältig: Die umweltfreundlichen Technologien sollen zum Erreichen der Klimaschutzziele beitragen, den stark wachsenden Energiebedarf kostengünstig decken, die Abhängigkeit von teuren Energieimporten reduzieren oder fossile Ressourcen für den Export vorbehalten.

Weltweit haben sich die erneuerbaren Energien – insbesondere Photovoltaik und Windenergie – nicht nur zu einer wichtigen Industriesparte entwickelt, sondern sie tragen mit ihrem Wachstum auch zu starken Veränderungen des Energiesystems bei. Im Vergleich zum konventionellen Kraftwerkspark produzieren Solar- und Windenergie Strom in Abhängigkeit vom Dargebot an Wind und Sonne. Um die tageszeitlichen Schwankungen in der Stromproduktion auszugleichen, müssen Möglichkeiten gefunden werden, Erzeugung und Bedarf aneinander anzupassen. Beispielsweise kann eine kombinierte Nutzung verschiedener Energietechnologien oder die Integration von Speicherkraftwerken eine stetigere Stromproduktion liefern.

Aus dieser Veränderung ergeben sich neue Forschungsfragen, die hauptsächlich auf die Integration und das Zusammenspiel der erneuerbaren Energien im System abzielen: Wie ist eine kosteneffiziente Nutzung erneuerbarer Energieressourcen in verschiedenen Regionen zu erreichen? Wie können verschiedene Technologien miteinander kombiniert werden, um den Energiebedarf optimal zu decken? Wie wird sich das Energiesystem insgesamt entwickeln? An welchen Stellen muss diese Entwicklung durch den Staat unterstützt werden? Das Fraunhofer ISE bietet für diese Fragestellungen eine Reihe von Lösungen, die in den folgenden Geschäftsfeldthemen angesiedelt sind:

- Techno-ökonomische Bewertung von Energietechnologien
- Marktanalysen und Geschäftsmodelle
- Kraftwerkseinsatzplanung und Betriebsstrategien
- Nationale und regionale Energieversorgungskonzepte
- Modellierung von Energieversorgungsszenarien

Am Fraunhofer ISE werden verschiedene Energietechnologien unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten analy-

siert, wie beispielsweise anhand von Stromgestehungskosten. Durch die Betrachtung des Zusammenspiels der Komponenten kann der Einsatz erneuerbarer Technologien für einen Kraftwerkspark oder ein Land hinsichtlich bestimmter Zielkriterien optimal ausgelegt werden.

Das Geschäftsfeld Energiesystemanalyse bietet unterschiedliche methodische Ansätze: Zum einen kann für ein bestimmtes CO₂-Minderungsziel ein Sektor-übergreifendes Zielsystem nach minimalen volkswirtschaftlichen Kosten ermittelt werden. Zum anderen kann durch ein Investitionsentscheidungsmodell aufgezeigt werden, wie sich das Energiesystem unter bestimmten Rahmenbedingungen entwickelt und wie das Zusammenspiel der Komponenten im Energiesystem funktioniert. Somit bieten unsere Modelle eine fundierte Grundlage für Entscheidungen über die Rahmenbedingungen einer zukünftigen Energieversorgung.

Ein weiterer Baustein des Geschäftsfelds Energiesystemanalyse ist die Entwicklung von Geschäftsmodellen, die wir unter Berücksichtigung der veränderten Rahmenbedingungen in verschiedenen Märkten anbieten. Wir entwickeln Möglichkeiten, wie erneuerbare Energietechnologien in Zukunft verstärkt zur Anwendung kommen können, auch in Ländern, in denen sie bisher noch nicht stark verbreitet sind. Auf diese Weise bietet das Fraunhofer ISE umfassende Methoden und Hilfsmittel, um die Herausforderungen eines sich ändernden Energiesystems zu bewältigen.

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	31
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	27
Zeitschriften- und Buchbeiträge	2
Vorträge und Konferenzbeiträge	18

www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/65



Erneuerbare Energien sind zu einer wichtigen Industriesparte geworden und tragen mit ihrem Wachstum zu starken Veränderungen im Energiesystem bei.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Thomas Schlegl

Telefon +49 761 4588-5473
thomas.schlegl@ise.fraunhofer.de

Techno-ökonomische Bewertung von Energietechnologien

Dipl. Wi.-Ing. Christoph Kost

Telefon +49 761 4588-5750
energysys.tech-econ@ise.fraunhofer.de

Marktanalysen und Geschäftsmodelle

Noha Saad Hussein M. Sc.

Telefon +49 761 4588-5081
energysys.business@ise.fraunhofer.de

Kraftwerkseinsatzplanung und Betriebsstrategien

Dr.-Ing. Niklas Hartmann

Telefon +49 761 4588-5730
energysys.powerplants@ise.fraunhofer.de

Nationale und regionale Energieversorgungskonzepte

Charlotte Senkpiel M. Eng.

Telefon +49 761 4588-5078
energysys.supply@ise.fraunhofer.de

Modellierung von Energieversorgungsszenarien

Prof. Dr. Hans-Martin Henning

Telefon +49 761 4588-5134
energysys.scenarios@ise.fraunhofer.de



WIRTSCHAFTLICHKEIT VON PHOTOVOLTAIK IN DER MENA-REGION

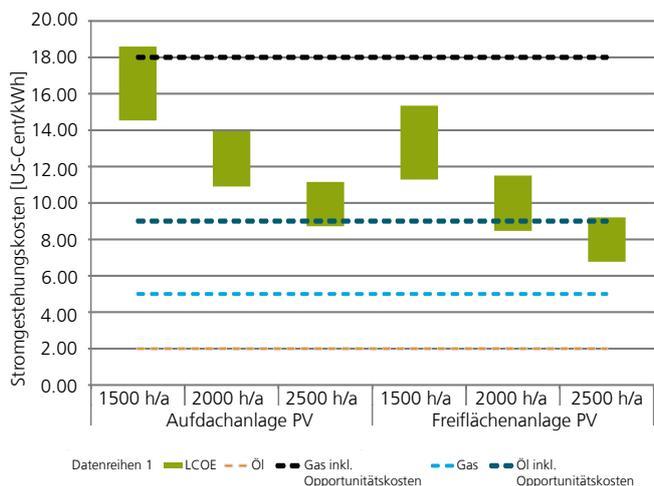
Die weltweit steigende Energienachfrage spiegelt sich auch im Nahen Osten und Nordafrika (MENA) wider. Es kommt dadurch dort zu wachsenden Ausgaben für fossile Brennstoffe, zu einer Verknappung der Öl- und Gasreserven sowie zu steigenden CO₂-Emissionen. Um diesen Entwicklungen entgegen zu wirken, setzen sich viele MENA-Länder ambitionierte Ziele für den Ausbau erneuerbarer Energien. Das Fraunhofer ISE unterstützt die Evaluierung des PV-Potenzials, der tatsächlichen Kosten und der Wirtschaftlichkeit. Dabei werden die PV-Kosten unter Berücksichtigung der Opportunitätskosten sowie der resultierenden CO₂-Einsparpotenziale mit anderen Technologien verglichen.

Niklas Hartmann, Verena Jülch, Christoph Kost,
Noha Saad Hussein, Charlotte Senkpiel, Jessica Thomsen,
 Thomas Schlegl

Der Einstieg in eine Stromerzeugung durch PV-Anlagen bietet Staaten mit starker Importabhängigkeit von fossilen Brennstoffen oder Unternehmen mit erheblichen Energieausgaben die Möglichkeit, steigenden Ausgaben für die Deckung ihrer Energienachfrage entgegen zu wirken. Öl oder Gas exportierende Länder dient der Zubau an Photovoltaik dazu, fossile Brennstoffe einzusparen und durch deren Export deutlich höhere Erlöse zu erzielen.

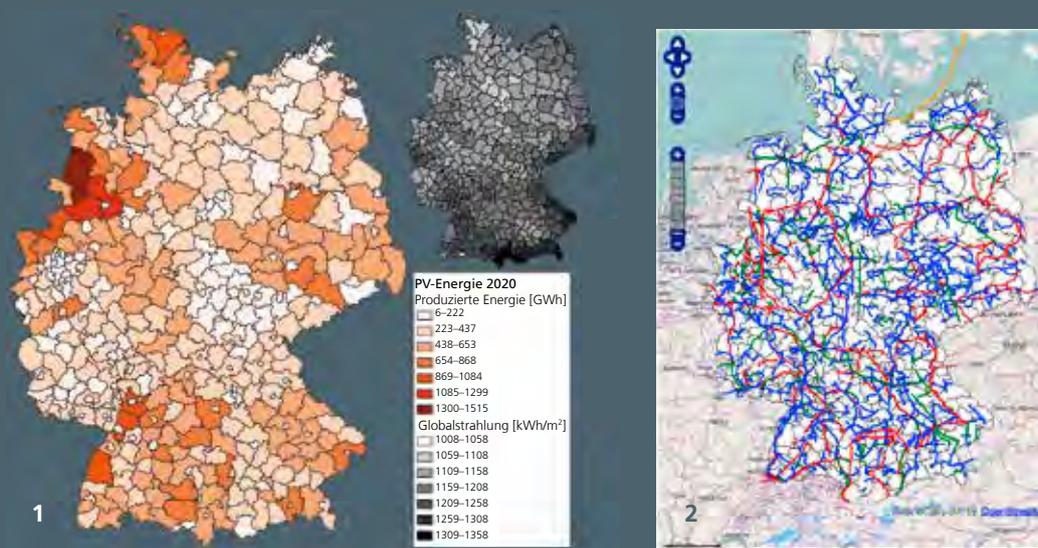
Zur Bewertung des wirtschaftlichen PV-Potenzials dieser Länder wird zunächst das verfügbare technische Potenzial von Freiflächen- und Dachsystemen ermittelt. Die Anzahl der tatsächlichen Installationen hängt allerdings stark von den ökonomischen Faktoren der Systeme an den jeweiligen Standorten ab, die sich häufig gegen subventionierte Stromerzeugung aus fossilen Energieträgern behaupten müssen. Daher spielen bei der wirtschaftlichen Betrachtung nicht nur die Stromgestehungskosten, sondern auch die Opportuni-

1 In der Region Naher Osten und Nordafrika (MENA) wächst das Interesse an erneuerbaren Energien.



2 Vergleich der Stromgestehungskosten von PV-Anlagen vs. konventionelle Technologien mit Opportunitätskosten.

tätskosten fossiler Energieträger eine Rolle. Dies ermöglicht einen Vergleich zwischen den Stromgestehungskosten aus Photovoltaik zu lokalen Preisen sowie Gas und Öl inklusive Opportunitätskosten (Abb. 2). Vielfach zeigt sich, dass Photovoltaik unter Einbezug der Opportunitätskosten bereits heute geringere Stromgestehungskosten aufweist. Damit wird eine Bewertung der Wirtschaftlichkeit von PV-Anlagen, ihres Ausbaupotenzials sowie eventuell notwendiger regulatorischer Maßnahmen ermöglicht. Ein weiterer Aspekt ist die Reduktion der CO₂-Emissionen, die in den MENA-Staaten eine große Rolle spielen. Daher analysieren wir die Einsparpotenziale durch den Einsatz erneuerbarer Energien.



REGIONALE MODELLIERUNG DER ENERGIEVERTEILUNG

Ziel der Bundesregierung ist, die Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2050 um 80–95% gegenüber 1990 zu reduzieren. Neben der Analyse eines kostenoptimalen zukünftigen Energiesystems stellt sich die Frage nach dem Tempo, mit dem sich ein Energiesystem verändern kann. Daher spielen zeitlich aufgelöste Transformationsprozesse für die Energiesystemanalyse eine wichtige Rolle. Anhand modellierter Entwicklungspfade können CO₂-Minderung, Netzauslastung oder benötigte Flexibilitätsoptionen analysiert werden. Der Weg zu einem Energiesystem der Zukunft, basierend auf erneuerbaren Energien, wird im Rahmen des Eigenforschungsprojekts »Erneuerbare Energien Szenarien (E2S)« analysiert und bewertet.

Günther Ebert, Niklas Hartmann, **Niklas Kreifels**, **Charlotte Senkpiel**, Christof Wittwer, Thomas Schlegl

Kernfrage bei der Darstellung von Entwicklungspfaden ist: Welche Gruppe von Akteuren investiert unter gesetzten Rahmenbedingungen in welche Technologie an welchem Standort? Basierend auf dem heutigen Energiesystem ermittelt das »E2S-Investmodell« explorativ den Zubau an erneuerbaren Energietechnologien, konventionellen Kraftwerken und Speichern. Zu Grunde liegen dabei politische, ökonomische und technische Rahmenbedingungen. Die betrachteten Investorengruppen sind Privatpersonen, EVUs, Banken und Fonds, Gewerbe, Projektierer und Landwirte. Jede Gruppe besitzt unterschiedliche Technologiepräferenzen – z. B. investieren Privatpersonen vornehmlich in PV-Aufdachanlagen – und unterschiedliche Finanzierungsbedingungen. Dadurch ist die Investition in eine Technologie nicht für jeden Investor gleichermaßen wirtschaftlich. Zusätzlich spielt gerade bei erneuerbaren Energietechnologien – aufgrund ihrer Abhängigkeit von natürlichen Ressourcen – der Standort eine bedeutende Rolle. Das »E2S-Investmodell« berücksichtigt auch die Veränderung

- 1 *Stromerzeugung durch Photovoltaik für das Jahr 2020, aufgelöst nach Stadt- und Landkreisen. Die schwarz-weiße Deutschlandkarte symbolisiert die zugrunde gelegte Strahlung für die Berechnung.*
- 2 *Aus OpenStreetMap ausgelesene Daten zur Modellierung des Höchstspannungnetzes. Hierauf aufbauend erfolgt die Simulation des Lastflusses im Netz.*

des Wohngebäudebestands bezüglich der Sanierung und Bereitstellungsart der Wärmeenergie.

Das E2S-Jahressimulationsmodell stellt den unterjährigen Betrieb einer gegebenen Energieversorgungsstruktur und somit regional und zeitlich aufgelöste Strom- und Wärmeströme dar. Es besteht aus einzelnen Submodellen. Diese setzen sich zusammen aus Modellen zur Simulation der Stromerzeugung von Photovoltaik- und Windkraftanlagen basierend auf meteorologischen Daten, der Einsatzplanung von Großkraftwerken und Speichern, der Sektor-übergreifenden dezentralen Erzeuger und der thermischen Nachfrage. Des Weiteren ist ein Netzmodell integriert, welches alle Leitungen der 110- bis 380-kV-Ebene umfasst und den Lastfluss simuliert.

Abb. 1 beschreibt beispielhaft für das Jahr 2020 die simulierte Jahreserzeugung der beiden fluktuierenden Technologien Photovoltaik und Windkraft, aufgelöst nach Stadt- und Landkreisen. Die zugrunde gelegte installierte Leistung wurde mit dem »E2S-Investmodell« ermittelt. Private Investoren haben dabei mit über 60% den größten Anteil an der Finanzierung von PV-Anlagen. Bayern, Nordrhein-Westfalen und Niedersachsen sind die Bundesländer mit der größten installierten PV-Leistung. Abb. 2 stellt aus OpenStreetMap ausgelesene Leitungsdaten dar. Aus diesen erfolgte die Modellierung des Höchstspannungnetzes, für welches der Lastfluss simuliert und Aus- und Überlastungen beschrieben werden können.



INTEGRIERTE WÄRME- UND KÄLTESTRATEGIE FÜR DEUTSCHLAND

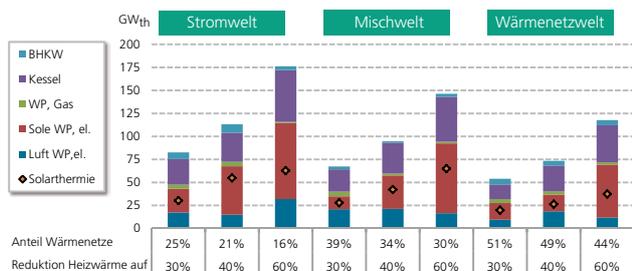
Rund 57% des Endenergiebedarfs Deutschlands entfällt auf Wärme, davon gut die Hälfte auf Raumwärme, knapp 40% auf Prozesswärme und knapp 10% auf Warmwasser. Rund 15% des Strombedarfs Deutschlands wird für Kälteprozesse – überwiegend in der Industrie – aufgewendet. Wärme- und Kälteanwendungen sind insofern maßgeblich an den energiebedingten Emissionen von Treibhausgasen beteiligt. Zentrale Fragestellungen unserer Analyse sind daher: Welcher Mix aus Verbrauchssenkung, Erhöhung der Effizienz der Wandlungsketten und Einsatz von erneuerbaren Energien ist sinnvoll, um die avisierten Klimaschutzziele für Wärme- und Kälteanwendungen zu erreichen? Und welche Bündel aus politischen Maßnahmen sind hierfür zielführend?

Sebastian Herkel, Christoph Kost, Andreas Palzer, Matthias Schickentanz, Lena Schnabel, **Hans-Martin Henning**

Im Auftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) wurde von einem Projektkonsortium unter Federführung des Fraunhofer ISE eine umfassende Analyse des Wärme- und Kältebereichs Deutschlands durchgeführt. Im ersten Teil des Auftrags wurden für alle Verbrauchssektoren – Haushalte, Gewerbe, Handel, Dienstleistungen und Industrie – basierend auf sehr umfangreichen Modellierungen Szenarioanalysen bis zum Jahr 2020 erarbeitet. Die Arbeiten zeigten, dass das Ziel, bis 2020 einen Anteil von 14% des Endenergiebedarfs aller Wärme- und Kälteanwendungen durch erneuerbare Energien zu decken, nur durch einen Mix aus unterschiedlichen ambitionierten Maßnahmen – Ordnungsrecht, finanzielle Förderung und zielgruppenspezifische Instrumente und Informationen – erreichbar ist.

In einem zweiten Teil wurde für den Wärmebedarf des Gebäudesektors ein Ausblick bis in das Jahr 2050 erarbeitet. Hierfür

- 1 Nutzung von solarthermischer Prozesswärme in einer Wäscherei.
- 2 Solare Wasserstoff-Tankstelle am Fraunhofer ISE.



- 3 Aus Optimierungsrechnungen resultierende Zusammensetzung (inst. Leistung in GW) der Heizungstechniken in Einzelgebäuden für verschiedene Zielsysteme, mit gewissem Umfang energetischer Sanierung und Ausbau von Wärmenetzen. Der untere Wert an der Abszisse stellt den Raumwärmebedarf des Gebäudesektors für 2050 in % des Werts von 2010 dar. Darüber wird der Anteil der Raumwärme angegeben, der über Wärmenetze abgedeckt wird. (BHKW = Blockheizkraftwerk, WP = Wärmepumpe)

wurden konsistente Zielsysteme definiert, die mit den Klimaschutzziele der Bundesregierung im Einklang stehen. Bei diesen Arbeiten wurden auch Modellrechnungen mit dem am Fraunhofer ISE entwickelten Rechen- und Optimierungsmodell »REMod-D« (Regenerative Energien-Modell Deutschland) durchgeführt. Ergebnisse zeigten u. a. die große Bedeutung von Wärmepumpen als zukünftige Heizungstechnik (Abb. 3).

Projektpartner waren das Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Öko-Institut, Bremer Energie-Institut, Energy Economics Group der TU Wien und IREES GmbH – Institut für Ressourceneffizienz und Energiestrategien.

www.ise.fraunhofer.de/remod-d

KOMPETENZFELDER



Makroaufnahme einer Wärmeübertragerstruktur aus Metalldrahtgeweben zur effizienten Verdampfung von natürlichen Kältemitteln. Der Prototyp hat eine Breite von ca. 400 mm und eine Höhe von etwa 100 mm.

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE erforscht und entwickelt technische Voraussetzungen für eine umweltfreundliche Energieversorgung. Dabei steht nicht nur die solare Energiegewinnung im Fokus der Arbeiten, sondern auch die flexible Speicherung, die intelligente Verteilung sowie die effiziente Nutzung von Energie. Wie alle Institute der Fraunhofer-Gesellschaft – der größten Organisation für angewandte Forschung in Europa – verfolgt das Fraunhofer ISE dabei einen stark praxisorientierten Ansatz. Es geht darum, mit und für die Industrie, neue Produkte und Verfahren zur Marktreife zu bringen. Das breite, anwendungsbezogene Tätigkeitsspektrum spiegelt sich in den zwölf Geschäftsfeldern des Fraunhofer ISE wider: Energieeffiziente Gebäude, Silicium-Photovoltaik, III-V- und Konzentrator-Photovoltaik, Farbstoff-, Organische und Neuartige Solarzellen, Photovoltaische Module und Kraftwerke, Solarthermie, Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Systemintegration und Netze – Strom, Wärme, Gas, Energieeffiziente Leistungselektronik, Emissionsfreie Mobilität, Speichertechnologien sowie Energiesystemanalyse.

Um dieses umfassende Forschungsgebiet zu bearbeiten, sind unterschiedliche wissenschaftliche Qualifikationen und Methoden erforderlich. Unter den rund 1300 Mitarbeitenden des Fraunhofer ISE sind daher Spezialisten verschiedener Fachrichtungen, die interdisziplinär zusammenarbeiten. In die Arbeit der zwölf Geschäftsfelder des Fraunhofer ISE fließt besonders das Know-how, die wissenschaftlichen Ansätze und die Methoden aus elf Kompetenzfeldern ein:

- Materialforschung
- Halbleitertechnologie
- Oberflächentechnologie
- Optik und Photonik
- Systemtechnik
- Elektro- und Regelungstechnik
- Informations- und Kommunikationstechnologie
- Prozess- und Verfahrenstechnik
- Produktionstechnologie
- Messen, Prüfen, Monitoring
- Modellierung und Simulation

Damit den Entwicklungsarbeiten für die Partner und Auftraggeber aus der Industrie oder der öffentlichen Hand stets aktuellste Forschungsergebnisse und -methoden zu Grunde

liegen können, kooperiert das Institut eng mit Universitäten, Fachhochschulen und anderen Forschungseinrichtungen. Forscher und Forscherinnen des Fraunhofer ISE sind im akademischen Lehrbetrieb engagiert (Seite 153). Zahlreiche Promovierende, Masteranden und Diplomanden aus verschiedenen Fachrichtungen tragen mit ihrem Wissen und ihrem Einsatz dazu bei, die hohe Themenkompetenz des Instituts weiter zu steigern (Seite 150). Das Fraunhofer ISE tritt zudem immer wieder als Veranstalter für Fachkongresse und Konferenzen auf und fördert so den fachlichen Austausch. Regelmäßig erhalten Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen des Fraunhofer ISE für ihre Forschungsarbeit Preise und Ehrungen (Seite 14).

Hochwertige Anlagen, Geräte und Laborausstattung ermöglichen es den Forscherinnen und Forschern, die wissenschaftlichen Verfahren und Methoden in den elf Kompetenzfeldern weiterzuentwickeln. Ein Beispiel dafür ist das neue Laborgebäude in Freiburg, das 2013 eingeweiht wurde. Auf einer Laborfläche von 2400 m² arbeiten dort Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler an Beschichtungen, Mikrostrukturen sowie optischen und photonischen Anwendungen für die Solarthermie und Photovoltaik. Durch die spezielle Bauweise und Ausstattung der Labors können besonders die Fähigkeiten in den Kompetenzfeldern Optik und Photonik, Materialforschung sowie Oberflächentechnologie deutlich ausgeweitet werden (Seite 132/133). Die Kompetenzen und Kenntnisse des Instituts sind damit auch über die Solarenergie-Branche hinaus immer stärker gefragt.

Neu geplant ist im Rahmen des Kompetenzfelds Messen, Prüfen, Monitoring ein Zentrum Wärmetransformation am Fraunhofer ISE. Angetrieben durch verschiedene Energieformen bieten Wärmetransformationsprozesse vielfältige Möglichkeiten, für unterschiedliche Zwecke Wärme bei bestimmten Temperaturen bereit zu stellen. Das Institut verfügt über Kompetenzen für verschiedene Antriebsformen (wie Strom, Wärme, Brennstoffe) und Zieltemperaturen (Wärme und Kälte) und kann von der Material- über die Komponentenentwicklung bis hin zu Systembewertung und Optimierung Know-how anbieten (Seite 130/131).

Weitere Informationen zu den elf Kompetenzfeldern:
www.ise.fraunhofer.de/de/kompetenzfelder



WÄRMETRANSFORMATION

**KOMPETENZFELDER
MATERIALFORSCHUNG
MESSEN, PRÜFEN, MONITORING**

Wärmetransformationsprozesse ermöglichen, Wärme von einem tiefen auf ein höheres Temperaturniveau anzuheben. Dafür werden unterschiedliche Energieformen (Strom, Brennstoffe, Wärme hoher Temperatur) als Antriebsenergie verwendet. Für die Bereitstellung von Wärme in Gebäuden sind Wärmepumpen die bekannteste Anwendung der Wärmetransformation; sie ermöglichen die effiziente Bereitstellung von Nutzwärme unter Einbeziehung von Umweltwärme (Außenluft, Erdreich). Kälteerzeugung basiert grundsätzlich auf Verfahren der Wärmetransformation. Das Fraunhofer ISE arbeitet seit vielen Jahren intensiv in diesem Themenfeld an Fragestellungen von der Material- und Komponentenentwicklung bis hin zur Systembewertung und Optimierung. Dafür steht uns ein neues, leistungsfähiges Test- und Entwicklungszentrum für ein weites Spektrum an Technologien, Anwendungsbereichen (Wärme, Kälte) und Leistungsklassen zur Verfügung.

Constanze Bongs, Danny Günther, Stefan Henninger, Ivan Malenković, Marek Miara, Alexander Morgenstern, Björn Nienborg, Thore Oltersdorf, Lena Schnabel, **Peter Schossig**, York Tiedtke, Jeanette Wapler, Hans-Martin Henning

Rund 50% des deutschen Endenergieverbrauchs entfällt auf die Wärme- und Kältebereitstellung. Verfahren in diesen Sektoren bieten insofern ein großes Potenzial für energieeffiziente Lösungen und den Einsatz von Umweltenergie oder die Nutzung erneuerbarer Energien.

Das Fraunhofer ISE führt seit vielen Jahren umfangreiche **Felduntersuchungen von Wärmepumpenanlagen** durch – sowohl für Wohn- und Nichtwohngebäude als auch in Neubauten und Bestandsgebäuden. Diese Untersuchungen erlauben neben der zuverlässigen Ermittlung von Effizienzkennwerten auch die detaillierte Analyse des Systemverhaltens. Dadurch können typische Fehler im praktischen Betrieb erkannt und Verbesserungsvorschläge erarbeitet werden, die von der Planungsphase über die Installation und Inbetriebnahme bis zur Betriebsphase reichen. Mit unseren Arbeiten konnten wir den erreichten technischen Stand zuverlässig und praxisnah dokumentieren. Die hier entwickelten, standardisierten Mess- und Auswertungsverfahren setzen internationale Maßstäbe und sind auch auf andere Anwendungsgebiete übertragbar.

Schwerpunkte unserer Arbeiten im Bereich der **Komponentenentwicklung** von Kaldampfverfahren sind kältemittelreduzierte Systeme, Systeme zur Vermeidung der Fehlverteilung von Luft oder Kältemittel sowie Technologien zur Verbesserung der Anlagensicherheit von Systemen mit brennbaren Kältemitteln. Hierfür stehen **Prüfstände** für Fluidverteiler, luftgekühlte Verdampfer und Multifluid-Verdampfer für fast alle denkbaren Typen von Wärmepumpen und Kälteanlagen zur Verfügung (Nutzleistung von bis zu 50kW; alle Quellen- und Senkenmedien).

Neben den seit langem marktgängigen elektrisch angetriebenen Wärmepumpen finden in den letzten Jahren zunehmend auch gasbefeuerte Sorptionswärmepumpen ihren Weg in den Markt und sind eine vielversprechende, klimascho-



nende Heizungstechnik der Zukunft. Das Fraunhofer ISE arbeitet seit vielen Jahren an der **Entwicklung von neuen Sorptionsmaterialien und verbesserten Komponenten (Adsorber, Verdampfer)** für Adsorptionswärmepumpen und Sorptionskälteanlagen und begleitet Hersteller in allen Phasen der Entwicklung bis zur Systembewertung im Feld.

Unsere Entwicklungsarbeiten werden durch grundlagennahe Modellierung unterstützt, wobei kommerzielle und am Fraunhofer ISE entwickelte Software zum Einsatz kommt (**System- und Detailsimulationen**, CAD, CAM, CFD etc.).

Für eine nachhaltige Marktentwicklung aller Wärmetransformationsverfahren sind transparente und verlässliche **Vermessungs- und Bewertungsmethoden** essentiell. Die technologischen und legislativen Neuerungen der letzten Jahre erfordern eine Weiterentwicklung von bestehenden und die Entwicklung neuer Bewertungsmethoden, sowohl für Komponenten als auch für ganze Systeme. Das Fraunhofer ISE ist an zahlreichen Vorhaben zur Entwicklung und Standardisierung solcher Methoden beteiligt (z. B. IEA, VDI).

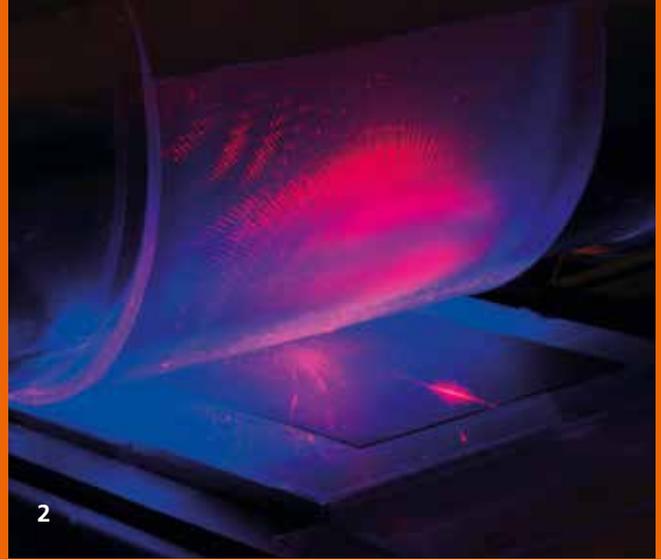
Mit dem neuen, mit neuester Messtechnik ausgestatteten **Test- und Entwicklungszentrum für Wärmetransformation**, das im Frühjahr 2014 in Betrieb geht, bauen wir unsere Infrastruktur umfänglich aus, um innovative Bewertungsmethoden für alle Wärmetransformationsverfahren erfolgreich zu implementieren, Hersteller bei der Anlagen- und Systementwicklung zu unterstützen und so insgesamt den Verfahren der Wärmetransformation zu verbesserter Wirtschaftlichkeit, gesteigerter Energieeffizienz und größerer Marktdurchdringung zu verhelfen.

Der Aufbau des **Test- und Entwicklungszentrums für Wärmetransformation** wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft (BMWi) unterstützt.

- 1 *Metallorganische Gerüstmaterialien erlauben die zielgerichtete Optimierung von Sorptionsmaterialien für unterschiedliche Anwendungsfälle.*
- 2 *Exemplarischer Stack-Aufbau für einen Luftkreuzstromwärmeübertrager basierend auf metallischen Gewebestrukturen.*
- 3 *Fluidverteiler-Teststand zur quantitativen Analyse der Fluidverteilung eines zweiphasigen Gemischs, das zur Beaufschlagung in Luft-Verdampfern für Wärmepumpen und Kälteanlagen notwendig ist.*
- 4 *Fertig installierte Wärmepumpenanlage im Feldtest zur kontinuierlichen Ermittlung von Effizienzkennwerten und zur Analyse des Systemverhaltens.*



1



2

FUNKTIONALE MIKRO- UND NANO-STRUKTUREN AUF GROSSEN FLÄCHEN

KOMPETENZFELD OPTIK UND PHOTONIK

Mikro- und Nanostrukturierte Oberflächen können eine Vielzahl von optischen wie auch nicht-optischen Funktionalitäten ermöglichen. Die großflächige Herstellung solcher Oberflächenstrukturen in maßgeschneiderten Formen und Dimensionen kann die Grundlage für eine industrielle Umsetzbarkeit sein. Die am Fraunhofer ISE etablierte Technologie der Interferenzlithographie bietet diesbezüglich einzigartige Möglichkeiten. In die Architektur und Infrastruktur des 2013 – Dank der Finanzierung durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und des Ministeriums für Finanzen und Wirtschaft Baden-Württemberg – fertiggestellten Laborgebäudes flossen die Anforderungen dieser neuen Technologie ein. Die implementierten Maßnahmen zur Verbesserung der Prozessstabilität führen dazu, dass nun durch Interferenzlithographie noch anspruchsvollere Strukturen in einer höheren Reproduzierbarkeit und Genauigkeit gefertigt werden können.

Benedikt Bläsi, Hubert Hauser, Oliver Höhn, Sabrina Jüchter, Volker Kübler, Eric Schneider, Christine Wellens, Werner Platzer

Die Funktionalisierung von Oberflächen durch eine Strukturierung kann vielerlei Effekte hervorrufen. Wir beschäftigen uns insbesondere mit dem Photonenmanagement in optischen Systemen, beispielsweise in Solarzellen, Beleuchtungssystemen, optischer Sensorik oder Displayanwendungen. Hierbei decken wir die komplette Kette vom Strukturdesign, der Herstellung von Masterstrukturen, der Replikation sowie der Charakterisierung ab.

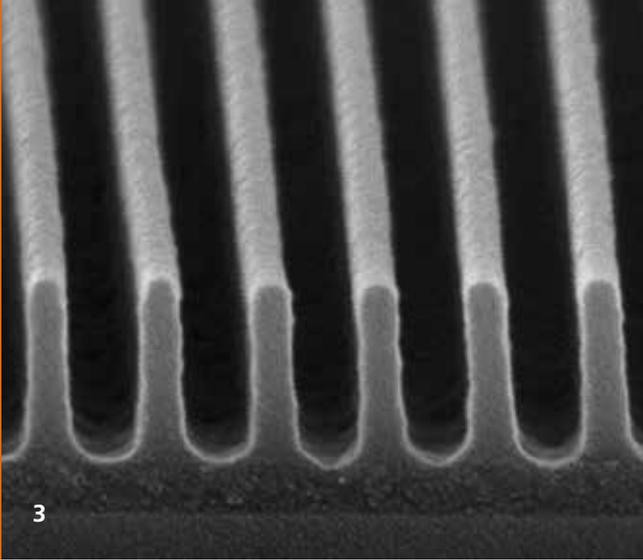
Wir nutzen eine Vielzahl von **Modellierungstools**, um sowohl strahlen- als auch wellenoptische Effekte abbilden zu können. Ziel hierbei ist zum einen, optische Effekte

- 1 *Beugungsgitter für Photonenmanagement auf einer Fläche von 1,2 x 1,2 m² im neuen Labor für die Interferenzlithographie.*
- 2 *Strukturierung einer Ätzmaske für die Honeycomb-Texturierung auf einem 125 x 125 mm² multikristallinen Siliciumsubstrat mittels des am Fraunhofer ISE entwickelten Aufbaus zur Rollen-Nanoimprint-Lithographie.*

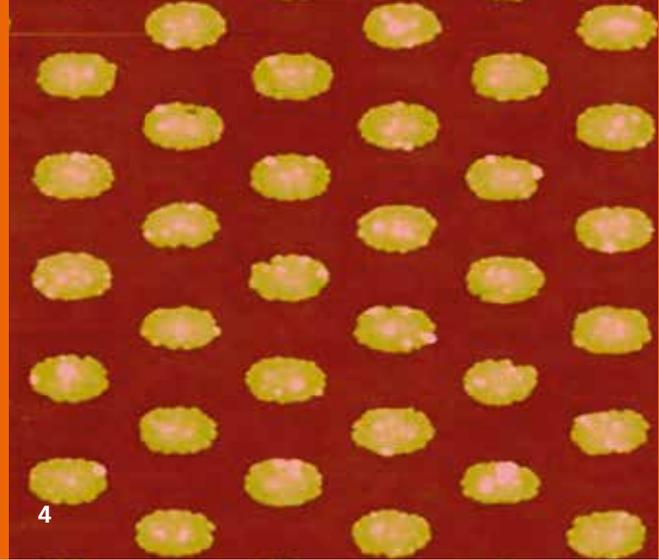
mikro- und nanostrukturierter Oberflächen zu verstehen, und zum anderen, Designvorgaben formulieren zu können, um maßgeschneiderte Funktionalitäten zu realisieren. Hierzu ist es besonders wichtig, die Einsatzbereiche verschiedener Simulationsansätze für spezifische Anwendungen zu kennen und diese gegebenenfalls sinnvoll zu kombinieren.

In der **Interferenzlithographie** werden Laserstrahlen geteilt und anschließend aufgeweitet und auf einem mit einem Photoresist beschichteten Substrat überlagert. Das resultierende Interferenzmuster wird nach einem darauffolgenden Entwicklungsprozess in ein Oberflächenrelief im Photoresist überführt. Diese Technologie ermöglicht es uns, maßgeschneiderte Mikro- und Nanostrukturen nahtlos auf Flächen bis zu 1,2 x 1,2 m² zu realisieren. Je nach Anforderung können die Strukturgrößen dabei lediglich 100 nm oder bis zu 100 µm betragen. Die Strukturen können dabei periodisch oder stochastisch angeordnet sein und auch bezüglich der Profilform können verschiedenste Geometrien realisiert werden (z. B. parabolische, binäre oder prismatische Formen). Die Möglichkeit, Mehrfachbelichtungen durchzuführen, erlaubt es zudem, diese verschiedenen Anordnungen wie auch Geometrien miteinander zu kombinieren.

Mikrostrukturierte Oberflächen sind insbesondere dann interessant, wenn sie über **Replikationsprozesse** kostengünstig



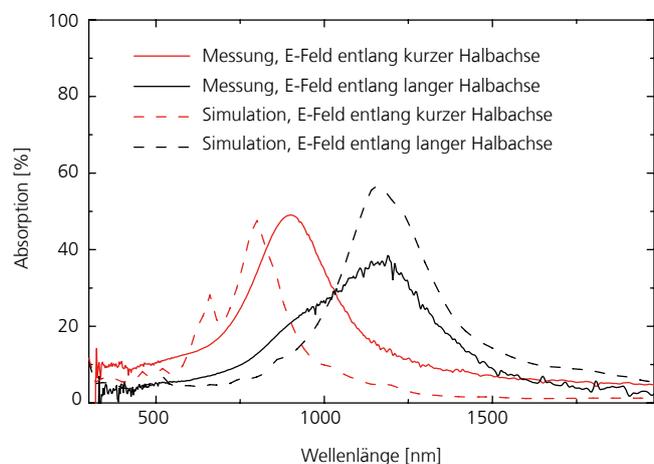
3 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines hochfrequenten Liniengitters mit hohem Aspektverhältnis für Lichtlenkungs- oder polarisationsoptische Anwendungen (Periode 230 nm).



4 Rasterkraftmikroskopische Aufnahme von elliptischen Silber-Nanopartikeln zur Nutzung plasmonischer Effekte in Solarzellen. Die Partikel können großflächig in einer Prozesskette aus Interferenzlithographie, Nanoimprint Lithographie, Metallisierung und Lift-Off in einer definierten Form realisiert werden. Die Partikel weisen entlang der großen und der kleinen Halbachse eine Größe von 240 nm beziehungsweise 140 nm auf und sind hexagonal in einem Netzebenenabstand von 300 nm angeordnet.

und in großen Mengen gefertigt werden können. Wir haben die Möglichkeit, verschiedenste Replikationsprozesse für unterschiedlichste Anwendungen zu evaluieren. Ein Ausgangspunkt ist hierzu typischerweise eine galvanische Replikation der interferenzlithographisch hergestellten Masterstrukturen. Auf diese Weise kann zunächst aus einem Photoresistmaster eine Vielzahl von metallischen Kopien erstellt werden. Diese wiederum können anschließend direkt als Prägewerkzeug in Heißpräge-, Spritzguss- oder Rolle-zu-Rolle-Prägeprozessen eingesetzt werden. Alternativ können diese metallischen Kopien genutzt werden, um Stempel aus flexiblen Materialien zu replizieren (z. B. aus Silikonwerkstoffen). Diese flexiblen Stempel können dann als Werkzeug in sogenannten Soft-Embossing, Micro-Contact-Printing oder Nanoimprint-Lithographie (NIL)-Prozessen eingesetzt werden. Am Fraunhofer ISE haben wir eine Rollen-NIL-Anlage entwickelt, die es uns ermöglicht, Resistschichten auf rauen, starren und opaken Substraten in einem Durchlaufprozess zu strukturieren (beispielsweise als Ätzmaske auf multikristallinen Substraten).

Ein wichtiger Aspekt der **Charakterisierung** strukturierter Oberflächen ist die Erfassung ihrer Geometrien. Hierzu stehen uns verschiedene Mikroskopieverfahren zur Verfügung (optische-, Rasterelektronen- und Rasterkraftmikroskopie). Zur spektral- und winkelabhängigen Vermessung optischer Funktionalitäten nutzen wir Spektrometer und Goniometer.



5 Polarisationsabhängige Messung und Simulation des Absorptionsverhaltens der in Abb. 4 dargestellten elliptischen Silber-Nanopartikel auf Glas. Die Polarisationsrichtungen sind dabei entlang der Halbachsen der Partikel orientiert. Als Simulationsmethode wurde in diesem Fall die Rigorous Coupled Wave Analysis (RCWA) verwendet, um die wellenoptischen Plasmonikeffekte zu erfassen.

SERVICEBEREICHE



In Ergänzung zu unserer Forschung und Entwicklung bieten wir Kunden Prüf- und Zertifizierungsverfahren an. Derzeit verfügt das Fraunhofer ISE über vier akkreditierte Testeinrichtungen: TestLab Solar Thermal Systems, TestLab Solar Façades, TestLab PV Modules und das Kalibrierlabor mit dem CalLab PV Cells und CalLab PV Modules. Zu unseren weiteren Servicebereichen zählen ein Batterie-Prüflabor, ein Wechselrichterlabor, ein Lichtlabor, Testeinrichtungen für Luft-Luft- und Luft-Wasser-Wärmeübertrager, Wärmepumpen und Verdampfer, ein Labor für die Charakterisierung von Phasenwechselmaterialien (PCM), ein Prüflabor für Adsorptions- und poröse Materialien und ein Testzentrum für Brennstoffzellen. Des Weiteren haben wir am Fraunhofer ISE damit begonnen, ein Entwicklungs- und Prüfzentrum für Systeme zur Wärmetransformation aufzubauen. Dort können in Zukunft elektrisch wie thermisch angetriebene Wärmepumpen vermessen und weiterentwickelt werden.

Über ihre Dienstleistungen hinaus haben diese Einrichtungen auch eine Forschungsfunktion. Die bei Charakterisierung, Prüfung oder Test gewonnenen Erkenntnisse können eingebettet werden in neue Forschungsthemen – sei es in der Produktentwicklung oder -verbesserung, bei der Weiterentwicklung von Testmethoden und Standards oder bei der Theorieentwicklung, z. B. im Bereich der modellbasierten Alterungsprognose.

Das TestLab Solar Thermal Systems ist seit Mai 2005 akkreditiert. Die Testeinrichtungen sind:

- Solarluftkollektorteststand
- Hagelschlagteststand
- System- und Speicherteststand
- Außenteststand mit Trackern und dynamischem Rack
- Innenteststand mit Solarsimulator
(max. Aperturfläche 3 x 3,5 m²)
- Kollektorteststand bis 200 °C
- 5 x 3 m² großer mechanischer Lastteststand in Klimakammer

Am TestLab Solar Thermal Systems werden in erster Linie Industriaufträge zur Prüfung von Kollektoren nach europäischen und internationalen Kollektor-, System-, Speichernormen für Qualitätslabel, z. B. das Solar Keymark des CEN, durchgeführt. Einzigartig ist die Möglichkeit der mechanischen Lastprüfung bei Temperaturen von -40 °C bis 90 °C (Seite 141).

Das TestLab Solar Façades erhielt die Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 im Jahr 2006. Es bietet Entwicklern, Herstellern und Planern von Fassaden(-komponenten) und Fenstern, einschließlich Sonnenschutz, ein umfassendes Dienstleistungsangebot zur Charakterisierung von innovativen Bauteilen oder Materialien. Das Leistungsspektrum umfasst insbesondere die Charakterisierung von Komponenten, die auch zur aktiven Solarenergienutzung dienen (transparente Fassadenkollektoren und BIPV). Neben den akkreditierten Prüfungen werden umfangreiche Dienstleistungen zum Thema Blendschutz und Tageslichtversorgung angeboten (Seite 142).

Geprüft werden im Rahmen der Akkreditierung:
g-Wert (auch kalorimetrisch), Transmissionsgrad (spektral und integral), Reflexionsgrad (spektral und integral) und U-Wert.

Das TestLab PV Modules besitzt seit 2006 die Akkreditierung für die Bauartzulassung von PV-Modulen gemäß IEC 61215 und IEC 61646 sowie seit 2011 für die Sicherheitsnorm IEC 61730. Ziel der Testeinrichtung ist die Qualitätssicherung der Zuverlässigkeit von PV-Modulen. Im Rahmen der Kooperation mit dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut übernimmt das Fraunhofer ISE alle Performance-Prüfungen, das VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut stellt nach erfolgreicher Prüfung die Zertifikate aus. Neben den Prüfungen für die Bauartzertifizierung werden entwicklungsbegleitende Prüfungen für Module und Modulkomponenten nach Anforderungen der Hersteller durchgeführt. Das TestLab PV Modules arbeitet dabei eng mit dem Kalibrierlabor am Fraunhofer ISE – CalLab PV Cells und CalLab PV Modules – zusammen (Seite 138/139).

Das vierte Labor, mit Akkreditierung seit November 2006, ist unser Kalibrierlabor mit dem CalLab PV Cells und CalLab PV Modules, das zu den weltweit führenden seiner Art zählt. Das Kalibrieren von Solarmodulen spielt eine wichtige Rolle bei Produktvergleichen und bei der Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken. Die Zellkalibrierung im CalLab PV Cells, das seit Ende 2008 als Kalibrierlabor beim Deutschen Kalibrierdienst (DKD) akkreditiert ist, dient als Referenz für Industrie und Forschung. Die Modulkalibrierung im CalLab PV Modules ist einerseits Bestandteil der Modul-Zertifizierung und dient andererseits der Qualitätssicherung von Anlagen sowie der Unterstützung bei der Entwicklung.

ANSPRECHPARTNER

CallLab PV Cells

Dr. Wilhelm Warta
Telefon +49 761 4588-5192
wilhelm.warta@ise.fraunhofer.de

Wendy Schneider
Telefon +49 761 4588-5146
cells@callab.de

Dr. Gerald Siefer
Mehrfach- und Konzentratorzellen
Telefon +49 761 4588-5433
gerald.siefer@ise.fraunhofer.de

CallLab PV Modules

Dipl.-Ing. (FH) Frank Neuberger
Telefon +49 761 4588-5280
frank.neuberger@ise.fraunhofer.de

Dr. Gerald Siefer
Konzentratormodule
Telefon +49 761 4588-5433
gerald.siefer@ise.fraunhofer.de

TestLab PV Modules

Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. (Arch.)
Claudio Ferrara
Telefon +49 761 4588-5650
claudio.ferrara@ise.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Daniel Philipp
Telefon +49 761 4588-5414
daniel.philipp@ise.fraunhofer.de

TestLab Solar Thermal Systems

Dipl.-Ing. (FH) Korbinian Kramer
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Mehnert
Telefon +49 761 4588-5354
testlab-sts@ise.fraunhofer.de

TestLab Solar Façades

Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Amann
g-Wert Prüfung
Telefon +49 761 4588-5142
ulrich.amann@ise.fraunhofer.de

Dipl.-Phys. Tilmann Kuhn
BIPV, Sonnenschutz
Telefon +49 761 4588-5297
tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Christoph Maurer
Solarthermische Fassaden
Telefon +49 761 4588-5667
christoph.maurer@ise.fraunhofer.de

Dr. Helen Rose Wilson
Spektrometrie, Goniometrie,
SRI und Farbmessung
Telefon +49 761 4588-5149
helen.rose.wilson@ise.fraunhofer.de

Dr.-Ing. Bruno Bueno
Tageslichtmessräume
Telefon +49 761 4588-5377
bruno.bueno@ise.fraunhofer.de



Langzeittest von Ventilen für Brennstoffzellensysteme bei tiefen Temperaturen in der Klimaprüfzelle.

Qualitätssicherung PV-Kraftwerke	Dipl.-Ing. (FH) Klaus Kiefer	Telefon +49 761 4588-5218 klaus.kiefer@ise.fraunhofer.de
Photovoltaik Leistungselektronik	Dr. Olivier Stalter Charakterisierung von Wechselrichtern	Telefon +49 761 4588-5467 olivier.stalter@ise.fraunhofer.de
Wechselrichterlabor	Dipl.-Ing. Sönke Rogalla	Telefon +49 761 4588-5454 soenke.rogalla@ise.fraunhofer.de
Batterie-Prüflabor	Dipl.-Ing. Stephan Lux	Telefon +49 761 4588-5419 stephan.lux@ise.fraunhofer.de
Lichtlabor	Dipl.-Ing. (FH) Norbert Pfanner	Telefon +49 761 4588-5224 norbert.pfanner@ise.fraunhofer.de
Lüftungsgeräte und Wärmepumpen	Dipl.-Ing. Thore Oltersdorf Prüfstand	Telefon +49 761 4588-5239 thore.oldersdorf@ise.fraunhofer.de
Wärmetransformation	Dipl.-Ing. Ivan Malenkovic	Telefon +49 761 4588-5533 ivan.malenkovic@ise.fraunhofer.de
Prüflabor Wärmeübertragung	Dr.-Ing. Lena Schnabel	Telefon +49 761 4588-5412 lena.schnabel@ise.fraunhofer.de
PCM-Labor	Dipl.-Ing. (FH) Thomas Haussmann	Telefon +49 761 4588-5351 thomas.haussmann@ise.fraunhofer.de
Prüflabor für Adsorptionsmaterialien und poröse Materialien	Dr. Stefan Henninger	Telefon +49 761 4588-5104 stefan.henninger@ise.fraunhofer.de
Testzentrum Brennstoffzelle	Dipl.-Ing. (FH) Thomas Jungmann	Telefon +49 761 4588-5213 thomas.jungmann@ise.fraunhofer.de



KALIBRIEREN VON SOLARZELLEN NACH INTERNATIONALEN STANDARDS

Das CallLab PV Cells am Fraunhofer ISE bietet die Messung / Kalibrierung von Solarzellen verschiedenster PV-Technologien an und arbeitet national und international mit Firmen und Instituten an der Entwicklung präziser Messungen für neue Technologien. Das CallLab PV Cells zählt zu den weltweit führenden PV-Kalibrierlabors. Das Kalibrierlabor ist Referenz für Forschung und Industrie, Solarzellenhersteller lassen ihre Referenzsolarzellen für die Produktion nach internationalen Standards bei uns kalibrieren.

Tobias Gandy, Jochen Hohl-Ebinger, Thomas Hultzsch, Robert Köhn, Katinka Kordelos, Markus Mundus, Michael Schachtner, Wendy Schneider, Holger Seifert, Astrid Semeraro, Karin Siebert, Gerald Siefer, **Wilhelm Warta**

Das CallLab PV Cells ist gemäß ISO/IEC 17025 als Kalibrierlabor für die Solarzellenkalibrierung beim Deutschen Kalibrierdienst DKD akkreditiert. In Kooperation mit PV-Herstellern und mit Unterstützung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) arbeiten wir an der kontinuierlichen Verbesserung der Messunsicherheiten und der Entwicklung neuer Messverfahren. So spielt die Entwicklung der Solarzellenparameter zu höheren Temperaturen (gemessen mit deren Temperaturkoeffizienten) eine wichtige Rolle für den Ertrag im praktischen Einsatz. Ein neues Verfahren, das es uns erlaubt, die Temperaturkoeffizienten mit bisher unerreichter Präzision zu bestimmen, wird inzwischen von Solarzellenherstellern rege nachgefragt. Besonderheit dabei ist die Messung der temperaturabhängigen spektralen Empfindlichkeit. Diese und weitere Spezialmessungen setzen wir in einem Projekt zur Optimierung von Hocheffizienz-Solarzellen für maximalen Jahresertrag auf Basis der hochpräzisen Analyse der temperatur- und intensitätsabhängigen Zelldaten ein. Die intensive Zusammenarbeit mit der Entwicklung und Analyse von Hocheffizienz-Solarzellen ist dabei eine wichtige Voraussetzung.

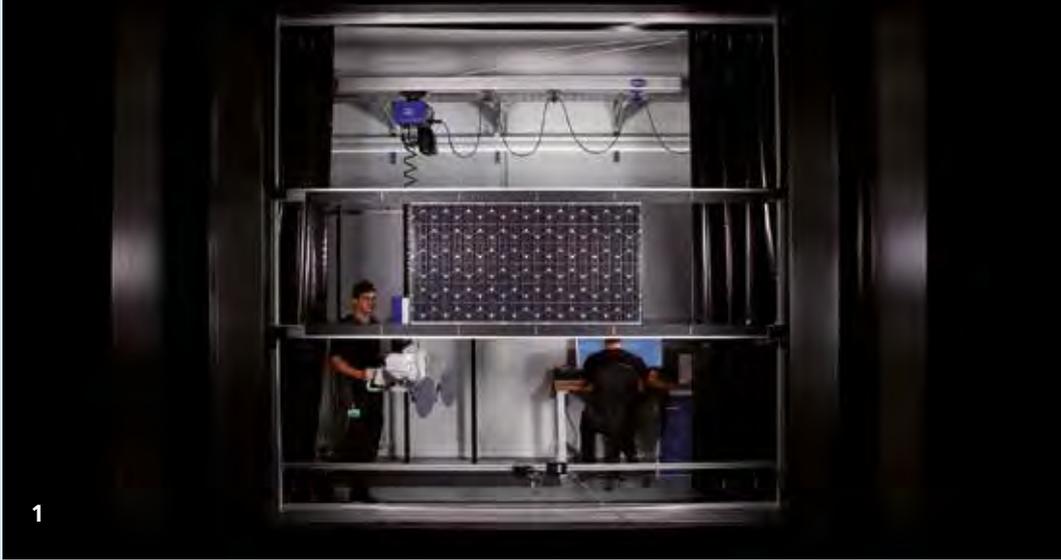
1 *Spektrale Empfindlichkeiten werden auch an großflächigen Solarzellen mit hoher Genauigkeit und mit exakter Angabe der Messunsicherheiten bestimmt.*

Um die Vergleichbarkeit von verschiedenen Solarzellentechnologien zu gewährleisten, arbeiten wir weiter an der Entwicklung von Messverfahren für neuartige Solarzellen. Wichtig sind hier vor allem einseitig kontaktierte sowie bifaciale Strukturen. Aber auch organische und Dünnschicht-Solarzellentechnologien, und hier wiederum die Mehrfachzellstrukturen, stellen eine besondere Herausforderung dar. Dabei können wir vorteilhaft unsere Erfahrungen mit der Kalibrierung von Mehrfachsolarzellen für Weltraum- und terrestrische Konzentratoranwendungen einbringen. Mit der Erweiterung unserer Kalibriermöglichkeiten von Mehrfachzellen aus Dünnschichtmaterialien konnten wir auch in diesem Jahr die Technologieentwicklung noch besser durch präzise Messungen unterstützen.

Die spektrale Empfindlichkeit bzw. externe Quanteneffizienz von Mehrfachsolarzellen wird an unserem Gittermonochromatormessplatz bestimmt, der speziell für die Vermessung von Mehrfachsolarzellen erweitert wurde.

Die Strom-Spannungskennlinie von Zweifach- und Dreifach-Solarzellen messen wir mit unserem Dreilichtquellensimulator unter nahezu beliebigen Normbedingungen, wie z. B. AM0 (ISO 15387) für Weltraum- und AM1.5d (ASTM G173-03) für Konzentratoranwendungen. Mit unserem Blitzlichtsimulator können Konzentratorsolarzellen bei bis zu 5000facher Sonneneinstrahlung vermessen werden.

Zusätzlich arbeiten wir unter anderem im Rahmen der Arbeitsgruppe WG7 des technischen Komitees TC82 der IEC an der Entwicklung von Kalibrierroutinen für Solarzellen mit mehr als 3 pn-Übergängen.



PRÄZISE CHARAKTERISIERUNG VON PV- UND CPV-MODULEN

Die weltweit einmalige Messunsicherheit von 1,8% des CallLab PV Modules ermöglicht die Leistungsermittlung für PV-Module mit höchster Präzision. Die hohe Qualität unserer Messungen wurde durch einen internationalen Vergleich mit den weltweit führenden Messlabors bestätigt.

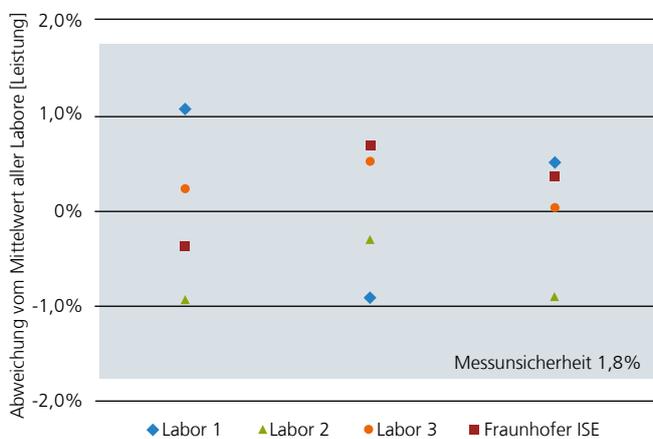
Daniela Dirnberger, Boris Farnung, Klaus Kiefer, **Frank Neuberger**, Michael Schachtner, **Gerald Siefer**, Harry Wirth

Die hohe Präzision und Qualität unserer Leistungsmessungen für PV-Module wurde durch einen vom CallLab PV Modules initiierten internationalen Rundvergleich der führenden Labors, dem NREL in USA, dem AIST in Japan und dem JRC in Italien erneut bestätigt. Mit einem Toleranzband innerhalb von einem Prozent sind am Fraunhofer ISE durchgeführte Messungen weltweit vergleichbar. Das Ergebnis untermauert somit die internationale Spitzenstellung des CallLab PV Modules mit der weltweit geringsten Messunsicherheit für den Leistungswert von 1,8%. Modulhersteller und Investoren können sich darauf verlassen, dass bei uns durchgeführte Messungen auch international anerkannt und vergleichbar sind.

Zusätzlich zur präzisen Leistungsbestimmung sind weitere Eigenschaften der PV-Module wichtige Einflussfaktoren auf den Ertrag einer PV-Anlage. Dazu zählen insbesondere die Anfangsdegradation (LID) sowie das Schwachlicht- und Temperaturverhalten der Module. Auf Basis dieser Power-Rating-Messungen sind präzise Vorhersagen für den Energieertrag von PV-Kraftwerken für jeden Standort weltweit möglich.

Auch die gezielte Auswahl von Modultypen für PV-Kraftwerke erhöht die Sicherheit für Investoren. Das Qualitäts-Benchmarking ist eine gemeinsam mit EPCs und Distributoren entwickelte Prozedur zur zeit- und kostenoptimierten Prüfung

1 Präzise Kalibrierung eines PV-Moduls im CallLab PV Modules.



2 Der Vergleich der vier international führenden Kalibrierlabors für Photovoltaikmodule zeigt, dass die Abweichungen vom Mittelwert aller Einrichtungen bei ± 1 Prozent liegen und damit deutlich innerhalb der Messunsicherheit von 1,8% des CallLab PV Modules.

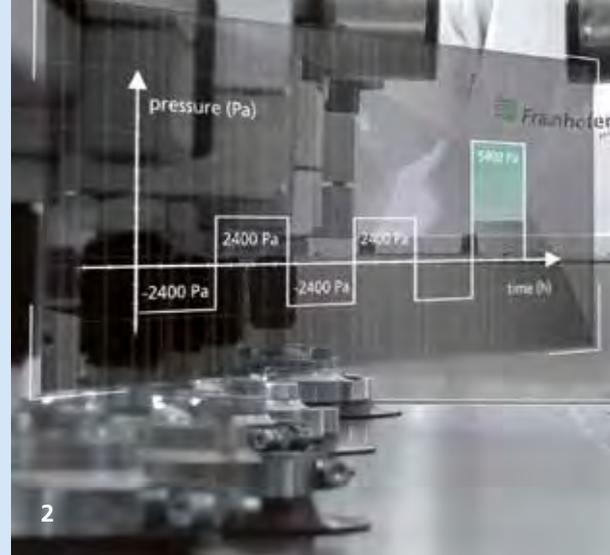
von PV-Modulen. Basierend auf den Qualitätsanforderungen der Kunden und der Einsatzgebiete der Module ergibt sich eine individuelle Prüfprozedur. Die im Vorfeld definierten Pass- / Fail-Kriterien führen zu einer objektiven und vom Hersteller unabhängigen Bewertung. Das CallLab PV Modules unterstützt somit Modulhersteller, EPCs und Investoren bei der Qualitätssicherung ihrer Produkte.

Vermessung von Konzentratormodulen

Zur Charakterisierung von Konzentratormodulen unter Freilandbedingungen stehen uns mehrere Nachführeinheiten mit Messdatenerfassung zur Verfügung. Zusätzlich betreiben wir einen Labormessplatz zur Vermessung von Konzentratormodulen. Dabei arbeiten wir aktiv in der Arbeitsgruppe WG7 des technischen Komitees TC82 der IEC an der Weiterentwicklung von internationalen Standards im Bereich der Konzentratorphotovoltaik mit.



1



2

TESTLAB PV MODULES

Das TestLab PV Modules bietet ein weites Spektrum an Dienstleistungen rund um Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprüfungen an. In unserem nach ISO 17025 akkreditierten Labor betreiben wir modernste und innovative Prüfanlagen. Nicht zuletzt durch unsere langjährige wissenschaftliche Erfahrung im Bereich der Gebrauchsdauermanalyse sind wir unseren Kunden ein kompetenter und unabhängiger Ansprechpartner.

Stefan Ali, Holger Ambrosi, Heinrich Berg, Ilie Cretu,
Claudio Ferrara, Georg Mülhöfer, **Daniel Philipp**,
 Sandor Stecklum, Carola Völker, Jeanette Wolf, Harry Wirth

Das TestLab PV Modules wurde 2006 als Servicebereich des Fraunhofer ISE gegründet. In Zusammenarbeit mit der Gruppe Gebrauchsdauerprüfung entwickeln wir Tests und Verfahren zur Sicherstellung von Qualität und Zuverlässigkeit von PV-Modulen. Hierfür verwenden wir innovative Anlagen, deren Anwendungsbereich deutlich über die Standardprüfungen hinausgeht. Dadurch können wir Degradationsfaktoren sehr real simulieren. Wir bieten folgende Dienstleistungen:

Beratung und Durchführung von kunden- und anwendungsspezifischen Prüfungen

Individuelle Fragen erfordern individuelle Antworten. In diesem Sinne bieten wir unseren Kunden kompetente, zielgerichtete Dienstleistungen an. Unabhängig davon, ob es um vergleichende Modulprüfungen (Benchmarking) oder um die Qualifizierung einer speziellen Modultechnologie für besondere Einsatzbedingungen geht, das Finden individueller und kosteneffizienter Kundenlösungen hat im TestLab PV Modules stets höchste Priorität.

1 In der kombinierten UV- und Feuchte-Wärme-Klimakammer können PV-Module bei einer maximalen UV-Dosis von 200 W/m², einer maximalen Feuchte von 60% r. F. und einer maximalen Temperatur von 90 °C gealtert werden. Über die Standardanforderungen hinaus kann somit das gleichzeitige Einwirken mehrerer Degradationsfaktoren simuliert werden.

2 Der mechanische Lasttest erlaubt sowohl die automatisierte Durchführung von IEC-konformen Prüfungen als auch von Prüfungen, die darüber hinausgehen (maximale Druck- und Sogleistung 10 kPa, max. Frequenz: 0,2 Hz).

Beurteilung und Analyse von Fehlerbildern, Risikominimierung

Potential Induced Degradation (PID), sogenannte Schnecken Spuren und Isolationsprobleme sind nur einige typische Fehlerbilder, mit denen Kunden häufig an uns herantreten. Wir bieten die Möglichkeit, diese und andere Fehlerbilder systematisch zu analysieren sowie Ursachen und Auswirkungen zu identifizieren. Unser Ziel ist es, das Auftreten derartiger Fehler insgesamt zu verringern. Daher bietet das TestLab PV Modules für viele typische Fehlerbilder zielgerichtete Prüfungen und Prüfsequenzen an.

Qualitätsprüfungen nach internationalen Standards

In enger Kooperation mit unserem Partner, dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut, führen wir Zertifizierungen entsprechend internationaler Qualitäts- und Sicherheitsstandards (IEC 61215, IEC 61646, IEC61730) durch. In internationalen Arbeitsgruppen setzen wir uns für die Weiterentwicklung dieser Standards ein.



PRÜFEN UND MITGESTALTEN IM TESTLAB SOLAR THERMAL SYSTEMS

Das TestLab Solar Thermal Systems ist eine weltweit durch nationale Zertifizierer anerkannte Prüfstelle und durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) voll akkreditiert (ISO 17025). Wir prüfen Sonnenkollektoren, Wärmespeicher sowie Komplettsysteme und unterstützen damit unsere Kunden bei der Entwicklung von solarthermischen Energiesystemen.

Sven Fahr, Konstantin Geimer, **Korbinian Kramer**, Stefan Mehnert, Arim Schäfer, Christian Schmidt, Christoph Thoma, Jasmin Veser, Werner Platzler

Seit 2012 unser großer Teststand für mechanische Lasten fertig gestellt wurde, konnten bereits eine Vielzahl an Kundenaufträgen damit bearbeitet werden. Der Teststand ist in eine Klimakammer eingebracht, was das Testen von unterschiedlichsten Lastfällen bei gleichzeitig eingestellter Umgebungstemperatur (-40 °C bis 90 °C) ermöglicht. Zu den Besonderheiten gehören auch die große Prüffläche mit 3 x 5 m und die möglichen hohen Lasten von bis zu 10 t sowie die Abbildung von verschiedenen Lastfällen, z. B. wechselnde Belastung, gradierte Lasten, Schublasten.

Weitergeführt wurden vergleichende Untersuchungen zu PV-Solarthermischen Hybridkollektoren (PVT). Damit steht für viele Varianten dieser Technologie eine Methodik zur Charakterisierung im TestLab Solar Thermal Systems zur Verfügung.

Abgeschlossen wurden die intensiven und langjährigen Arbeiten an unserem Solarluftkollektorteststand. Eine technische Charakterisierung, ähnlich wie für flüssigkeitsführende Kollektoren, ist nun möglich. Zudem wurde eine Erweiterung der Testmöglichkeiten für unabgedeckte Luftkollektoren realisiert.

1 Wissenschaftler des Fraunhofer TestLab Solar Thermal Systems auf der Testfläche des Freiluftlabors in Freiburg.

Systemuntersuchungen, insbesondere auch Speichervermessung nach DIN EN 12977-3,4 können in unserem System- und Speicherlabor durchgeführt werden. Hier werden auch die notwendigen Kennzahlen zur Bewertung von Speichern nach dem Energy Label der EU ermittelt.

Seit 2002 betreiben wir im TestLab Solar Thermal Systems einen Solarsimulator. 2012 konnte eine weitergehende Automatisierung des Laborbetriebs umgesetzt werden, was die gewohnt hohe Wiederholgenauigkeit einfacher realisierbar macht.

In Kombination mit unserem Präzisions-Tracker konnten wir unseren Mitteltemperatur-Teststand einsetzen, um Wirkungsgradkennlinien mit Arbeitspunkten bis zu 200 °C zu bestimmen. Dadurch sind im TestLab Solar Thermal Systems experimentelle Charakterisierungsarbeiten zu konzentrierenden Prozesswärmekollektoren (z. B. für solarthermisch angetriebene Klimatisierung) möglich.

2013 konnten auch in der Normungsarbeit, die von unseren Mitarbeitern geleistet wird, viele methodische Weiterentwicklungen umgesetzt werden, die sich in den neuen Normen wiederfinden werden. So wird das TestLab Solar Thermal Systems seinem Anspruch gerecht, nicht nur zu prüfen, sondern auch Maßstäbe zu setzen und mit zu gestalten.

www.kollektortest.de



VERMESSUNG VON FASSADEN UND TRANSPARENTEN BAUTEILEN

Entwicklern, Herstellern und Planern von Fassaden, -komponenten und solaren Komponenten bieten wir im TestLab Solar Façades ein umfassendes Dienstleistungsangebot zur Charakterisierung von innovativen Bauteilen oder Materialien an. Für transparente Bauteile und Sonnenschutzsysteme stehen Speziallabors zur Bestimmung der optischen und thermischen Eigenschaften zur Verfügung. Bei Fassaden zur aktiven Solarenergienutzung (mit PV und / oder Solarthermie) bieten wir eine umfassende Charakterisierung an, die auch die Wechselwirkung zwischen Ertrag, Komfort und passiven Solarerträgen berücksichtigt. Außerdem verfügen wir über einen Tageslicht-Container und einen Außenprüfstand.

Ulrich Amann, Johannes Hanek, Angelika Helde, **Tilmann Kuhn**, Jan Wienold, Helen Rose Wilson, Hans-Martin Henning

Wir charakterisieren transparente und transluzente Materialien, prüfen Bauteile, z. B. Verglasungen und bewerten die energetischen, thermischen und optischen Eigenschaften von kompletten Fassaden.

Folgende Prüfstände stehen zur Verfügung:

- Solarkalorimeter zur Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrads (g-Werts), auch für aktive Solarfassaden
- Wirkungsgradmessung
- U-Wert Prüfstand für Verglasungen
- winkelabhängige Transmissions- und Reflexionsmessungen mit großen Ulbrichtkugeln, auch spektral
- UV-vis-NIR Spektrometer zur Bestimmung der spektralen Eigenschaften von Gläsern, Folien und Oberflächen

1 Solarkalorimeter am Fraunhofer ISE zur Bestimmung des Gesamtenergiedurchlassgrads (g-Wert).

Das Labor ist seit 2006 nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditiert. Dabei handelt es sich um eine flexible Akkreditierung, die auch am Fraunhofer ISE entwickelte und über den Stand der Technik hinausgehende Verfahren für g-Wert, Transmission, Reflexion und U-Wert umfasst. Das Prüflabor darf baurechtlich bei der Bestimmung des bauphysikalischen Kennwerts g (Gesamtenergiedurchlassgrad) einbezogen werden. Die Entwicklung der Prüfverfahren wurde teilweise öffentlich gefördert.

Tageslichtmessräume

Die Tageslichtmessräume bestehen aus zwei identischen Büroräumen. Sie sind drehbar und ermöglichen beliebige Fassadenorientierungen.

- Blendschutzprüfungen
- Nutzerakzeptanzuntersuchungen
- Vergleich der Beleuchtungssituation hinter zwei Fassadensystemen

Fassadenprüfstand

Zusätzlich zu Labormessungen bieten wir die Vermessung von kompletten Fassaden unter realen Klimabedingungen an. Langzeituntersuchungen ermöglichen Aussagen über Stabilität, Schaltverhalten und Belastungen der Fassade. Die Optimierung von Reglern kann experimentell validiert werden.



1

© Belectric

Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken

Das Fraunhofer ISE leistet seit 1990 mit seinen Dienstleistungen einen wichtigen Beitrag zur Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken. Mit den vier Schritten unseres Qualitätszirkels bieten wir eine durchgehende Qualitätsbewertung von der Planung bis zum laufenden Betrieb von PV-Kraftwerken an:

Unsere Ertragsgutachten liefern Investoren und Banken die Grundlagen für eine wirtschaftliche Bewertung des geplanten PV-Kraftwerks und genaue Aussagen über den zu erwartenden Ertrag am Standort. Bei der Simulation der Komponenten stützen wir uns auf unser Expertenwissen aus dem Feld und unsere Erfahrungen aus der Charakterisierung der Komponenten aus den Labors. Die weltweit einmalige Messunsicherheit von 1,8% des Callab PV Modules ermöglicht die Leistungsermittlung für PV-Module mit höchster Präzision.

Damit unsere Kunden sicher sein können, dass ihr Kraftwerk auch wirklich dem Stand der Technik entspricht und die versprochene Leistung bringt, bieten wir eine umfangreiche Vollprüfung des gesamten Kraftwerks an. Eine Vor-Ort-Analyse mit visueller Überprüfung, thermographischen Aufnahmen und tatsächlicher Leistungsermittlung gibt Aufschluss über die Qualität der Anlage und dokumentiert allfällige Mängel.

Hat eine PV-Anlage den Betrieb aufgenommen, ermitteln wir die tatsächliche Performance Ratio des Kraftwerks und vergleichen die Ergebnisse mit den Werten des Ertragsgutachtens. Durch die frühzeitige Erkennung eines nicht optimalen Betriebs ermöglichen wir den Kraftwerksbetreibern rechtzeitig notwendige Korrekturmaßnahmen zu treffen.

Boris Farnung, Laura Hardt, Klaus Kiefer, **Christian Reise**, Andreas Steinhüser, Harry Wirth

1 In Templin, Deutschlands größtem PV-Kraftwerk, haben wir eine durchgehende Qualitätssicherung durchgeführt.



2

Batterie-Prüflabor

Batterietechnologien

Wir prüfen auf einer Fläche von über 400 m² Batterien und Systeme auf der Basis von z. B. Blei, NiMH, Li-Ionen-Zellen sowie Hochtemperaturbatterien und Doppelschichtkondensatoren. Die Laborausstattung beinhaltet Batterietestsysteme und Impedanzspektrometer, mit denen nach Norm oder nach Kundenanforderung in der Klimakammer oder im Wasserbad getestet wird.

Langzeittests

Für Alterungsuntersuchungen und Lebensdaueranalysen von Batterien und -systemen bieten wir mehrmonatige Langzeittests an.

Automotive-Bereich

Wir testen Systeme bis zu 250 kW bei Strömen bis zu 600 A und Spannungen bis zu 1000 V und können die Systeme über eine CAN-Bus Schnittstelle ansteuern.

Stationäre Solarspeicher

Die dezentrale Speicherung elektrischer Energie in Batteriesystemen wird immer wichtiger. Wir testen mit Solarsimulatoren, Dieselgeneratoren und unserer modernen Ausstattung an Wechselrichtern und Laderegeln elektrische Speichersysteme in einer realitätsnahen Umgebung.

Georg Bopp, Nikolaus Lang, **Stephan Lux**, Stefan Rinne, Matthias Vetter, Günther Ebert

2 Batteriespeicher, z. B. für den Automotive-Bereich, können bei Leistungen bis zu 250 kW getestet werden.



Inverter Laboratory

Das Inverter Laboratory des Fraunhofer ISE bietet alle notwendigen Einrichtungen für die Prüfung von Zentralwechselrichtern bis zu einer Leistung von 1 MW nach diversen Netzeinspeisungs-Richtlinien. Eine mittelspannungsseitige »Low Voltage Ride Through«-Prüfeinrichtung erlaubt es uns, das Verhalten von Wechselrichtern während kurzzeitiger Netzfehler zu untersuchen. Mit unserer hochpräzisen Messtechnik können zudem sowohl der Umwandlungs- als auch der Anpassungswirkungsgrad (MPPT-Verhalten) zuverlässig bestimmt werden.

Um ähnliche Prüfungen auch für andere Erzeugungseinheiten anbieten zu können, verfügen wir über einen mobilen Spannungseinbruchs-Prüfcontainer. Damit können LVRT-Tests in Solarparks, bei Blockheizkraftwerken oder Windkraftanlagen mit einer Leistung von bis zu 4,5 MW durchgeführt werden.

Dank internationaler Kooperationen sind wir in der Lage, bei Fragestellungen zu nationalen (BDEW) wie auch internationalen Richtlinien (China, Spanien, Italien etc.) Unterstützung zu leisten. Zudem können wir unseren Kunden umfangreiche Simulationsdienstleistungen sowohl für die Einheiten- und Anlagenzertifizierung als auch zu spezifischen Problemen in PV-Parks anbieten.

Robin Grab, **Sönke Rogalla**, Günther Ebert

1 Das Inverter Laboratory ermöglicht eine detaillierte Analyse von Wechselrichtern bis 1 MW hinsichtlich Performance und Verhalten am Netz.



Lichtlabor

Charakterisierung

Wir führen präzise Messungen lichttechnischer Größen an LED und Leuchtstofflampen, Leuchten und Beleuchtungssystemen durch, z. B. Messung des Lichtstroms, der Lichtausbeute und der Beleuchtungsstärkeverteilung, sowie das lichttechnische Betriebs- und Langzeitverhalten unter verschiedenen Umgebungsbedingungen. Für LED-Leuchtmittel und LED-bestückte Leuchten ermitteln wir die L70 bzw. L50 Lebensdauer bei verschiedenen Betriebsbedingungen und messen die erreichbare Beleuchtungsdauer (Autonomiezeit) bei batterieversorgten Leuchten. Wir erfassen ebenfalls die elektrischen Eigenschaften von Betriebselektronik und Vorschaltgeräten wie den Wirkungsgrad, das Betriebsführungsverhalten und das Fehler- und Überlastverhalten.

Apparative Ausstattung

- softwaregesteuerter Lichtmessstand mit einem Kugelphotometer mit 1,50 m Durchmesser
- softwaregesteuertes Spektrometer zur automatisierten Messung der spektralen Lichtverteilung mit einem Kugelphotometer mit 1,0 m Durchmesser
- Leuchtdichtekamera, Luxmeter und Langzeitteststände
- breitbandige, präzise Wattmeter, Digitaloszilloskope
- programmierbare, langzeitstabile Stromversorgungen

Georg Bopp, **Norbert Pfanner**, Günther Ebert

2 Kugelphotometer des Lichtlabors zur Erfassung des Lichtstroms und der Lichtausbeute sowie des Langzeitverhaltens von Lichtquellen und Leuchten.



SmartEnergyLab für thermisch-elektrische Gebäudeenergiesysteme

Die zunehmend wirtschaftlich attraktiven dezentralen Erzeuger erobern unsere Wohngebäude und erzeugen Energie dort, wo sie verbraucht wird. Veränderungen in der Förderstruktur führen zu neuen Betriebsstrategien, von der reinen Vollein- speisung hin zur Eigenversorgung mit lokalen netzdienlichen Regelungskonzepten.

Das SmartEnergyLab verfügt über eine vollständige Ausstattung von dezentralen Erzeugungstechnologien und Speichern zukünftiger Wohngebäude. Über leistungsfähige Simulationsrechner wird der modellbasierte »Hardware-In-The-Loop«-Betrieb ermöglicht. So können für die Bewertung von innovativen Systemkomponenten wie PV-Batteriesystemen und Wärmepumpen beliebige dynamische Szenarien für Last und Erzeugung im häuslichen Kontext aufgeprägt werden.

Die Infrastruktur des SmartEnergyLab ermöglicht Systeman- bietern sowohl ihre Einzelsysteme als auch Gesamtkonzepte in einer realitätsnahen Umgebung zu testen und zu evaluieren. Diese Analysen beinhalten beispielsweise Effizienzbewer- tungen sowie die Bewertung und Entwicklung von Energie- management-Gateways oder lokalen Regelungskonzepten.

Bernhard Wille-Haußmann, Christof Wittwer,
Günther Ebert

Teststand für Wärmepumpen

Für die Prüfung von Kompressionswärmepumpen und Verdampfer stehen uns mehrere Prüfstände zur Verfügung, mit der Möglichkeit, typische Quellen und Senken (Erdreich, Grundwasser, Außen- / Abluft) zu simulieren (Hardware-In-The-Loop).

Wir decken bei der Leistungsvermessung einen Bereich von 0,5–3 kW für nicht selbst ansaugende Wärmepumpen bzw. 0–2 kW bei entsprechenden Kälteanlagen ab. Dabei kann ein Temperaturbereich von -15–40 °C und ein Feuchtebereich von bis zu 25–95% für das Medium Luft als Senke bzw. Quelle abgedeckt werden. Bei hydraulisch angeschlossenen Geräten und Komponenten erreichen wir Rückkühlleistungen, die im Beharrungspunkt bis zu 12 kW Heizleistung entsprechen. Der abgedeckte Temperaturbereich für Senken und Quellen ist hierbei -15–90 °C. Darüber hinaus steht ein Teststand für Verdampfer zur Verfügung in einem Leistungsbereich von 1–6,5 kW Kälteleistung.

Die Vermessung erfolgt gemäß EN 14511 für das Heizen (oder Kühlen) und EN 16147 (ehemals EN 255-3) für die Warmwassererzeugung mit Speicher. Der Verdampferteststand orientiert sich an den Vorgaben aus der EN 328. Der Teststand ist für brennbare Kältemittel (R290, R1270) ausgelegt.

Simon Braungardt, Marek Miara, **Thore Oltersdorf**,
Christian Sonner, Jeannette Wapler, Hans-Martin Henning

1 Innenansicht des SmartEnergyLab.

2 Teststand zur Charakterisierung von Verdampfern für die Kälte- mittel R290 sowie R1270. Im gezeigten Einbauzustand wird ein Luft- kühler als Lamellen-Rundrohrwärmeübertrager vermessen.



Prüfung und Entwicklung von Wärmeübertragern

Zur Bewertung von Wärmeübertragern stehen verschiedene Prüfstände zur Verfügung:

- Luft- / Wasser-Wärmeübertrager (Luft: 10–1200 m³/h bei definierter Eintrittsfeuchte und -temperatur, Wasser: 60–1800 l/h bei definierter Eintrittstemperatur)
- Luft- / Luft-Wärmeübertrager (150–500 m³/h bei definierter Eintrittsfeuchte und -temperatur, auch für offene Sorption geeignet)
- Verdampfer (für die Arbeitsmittel Wasser und Kohlenwasserstoffe) und Adsorber (nur Wasser) (Verdampfungsleistung bis 2,5 kW, Adsorptionskapazität bis 8 kg)

Die Sensorik der Prüfstände erlaubt die Bestimmung der Übertragungsleistung, des Wärmedurchgangs und der Wärmeübergangskoeffizienten. Die experimentelle Expertise wird ergänzt durch die simulationsbasierte Bewertung. Hier werden je nach Fragestellung Werkzeuge wie COMSOL Multiphysics, OpenFoam, CoilDesigner, IMST-ART, Modelica oder eigene Software verwendet.

Zur Untersuchung der Strömungscharakteristik, der Fluid- und Temperaturverteilung sowie der Wärme- und Stofftransportdynamik sind weitere Prüf- und Simulationsverfahren vorhanden, die für charakteristische Elemente eines Wärmeübertragers die Identifikation der relevanten Einflussgrößen ermöglichen.

Gerrit Földner, Michael Herrmann, Alexander Morgenstern, Thore Oltersdorf, **Lena Schnabel**, Peter Schossig, Ursula Wittstadt, Hans-Martin Henning

1 Prüfstand zur Vermessung der Adsorptionskapazität und -dynamik von Adsorptionswärmeübertragern.



PCM-Labor: Charakterisierung von Latentwärmespeichermaterialien

Im PCM-Labor (Phase Change Material) werden Latentwärmespeicher-Materialien, -Verbünde, -Objekte und Systeme gemäß den Prüfkriterien nach RAL GZ 869 vermessen. Das Labor ist zugelassene Zertifizierungsstelle für dieses Gütezeichen.

Außerdem stehen Messgeräte für folgende Materialparameter zur Verfügung:

- Wärmeleitfähigkeit und k-Wert von Baustoffen und Wandaufbauten
- spezifische und latente Wärmespeicherkapazität, Nukleationstemperatur und Unterkühlung mittels Calvet- und Heatflux DSCs
- Zyklierungsapparaturen
- Adiabater Testraum entsprechend DIN EN 14240 zur statischen und dynamischen Vermessung von Heiz- und Kühlsystemen
- Testräume mit Außenbezug zur Vermessung von PCM-Systemen
- speziell für Phasenwechselfluide PCS:
 - Dichte
 - Wärmeleitfähigkeit
 - Partikelgrößen
 - Viskosität
 - Stabilitätsanalyse
- Teststände zur Herstellung, Charakterisierung und Zyklierung von Emulsionen

Stefan Gschwander, **Thomas Haussmann**, Peter Schossig, Hans-Martin Henning

2 Calvet DSC zur thermischen Charakterisierung der PCM.



Prüflabor für poröse Materialien und Werkstoffe

Die Labors für Thermo- und Strukturanalytik bieten ein breites Spektrum an Analysemöglichkeiten rund um die Materialentwicklung und Fragestellungen bezüglich Oberfläche, Porenstruktur und Porosität, Adsorptionscharakteristik bezüglich verschiedener Gase sowie der Morphologie von porösen Materialien und Werkstoffen.

Wir haben die Möglichkeit, isotherme Gassorptionsmessungen mit verschiedenen Prüfgasen (N_2 , CO_2 , EtOH, MeOH, H_2O) zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche, des Porenvolumens und der Porengrößenverteilung und die gesamte Adsorptionscharakteristik mit volumetrischen Methoden durchzuführen.

Zusätzlich stehen für die Messgase H_2O , EtOH und MeOH auch thermogravimetrische Methoden, d. h. Bestimmung der Adsorptivaufnahme in Abhängigkeit von Druck und Temperatur durch Isobaren oder Isothermen, zur Verfügung. Geräte zur Makroporencharakterisierung durch Quecksilberintrusion sowie zur Dichtebestimmung durch Helium-Pyknometrie runden das Profil ab.

Im Hinblick auf Wärmekapazität und -leitfähigkeit stehen verschiedene Kalorimeter in unterschiedlichen Größen- und Temperaturbereichen sowie zwei Laser-Flash-Anlagen zur Verfügung. Die morphologischen Untersuchungsmethoden umfassen Licht- und Laser-Scanning-Mikroskopie zur Bestimmung von Teilchenform und Teilchengrößenverteilungen, Rauigkeit sowie Homogenität von Oberflächen und Röntgenpulverdiffraktometrie zur Strukturanalyse.

Max Baumgartner, **Stefan Henninger**, Philipp Hügenell, Harry Kummer, Gunther Munz, Peter Schossig, Hans-Martin Henning

1 *Thermowaage zur Bestimmung der Wasserdampfaufnahmekapazität großer Verbundproben in Abhängigkeit von Druck und Temperatur.*



Testzentrum Brennstoffzelle

In unserem Testzentrum Brennstoffzelle charakterisieren, testen und prüfen wir Membran-Brennstoffzellen und -Systeme mit elektrischen Leistungen bis 20 kW_{el} .

Bei der Charakterisierung von Brennstoffzellen legen wir Wert auf eine detaillierte Untersuchung lokaler Vorgänge. Mit Hilfe unserer 68-Kanal-Anlage zur ortsaufgelösten, elektrochemischen Impedanzspektroskopie von segmentierten Einzelzellen können wir die chemisch-physikalischen Prozesse hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von Materialien, Konstruktion und Betriebsführung analysieren.

Unsere begehbare Klimakammer ermöglicht Untersuchungen von Stacks und Systemen bei Temperaturen von -40 °C bis $+80\text{ °C}$ und relativen Feuchten zwischen 10 und 95%. Hervorzuheben ist der hohe Durchsatz klimatisierter Luft bis zu 2000 m^3 pro Stunde. Um das Verhalten der Brennstoffzelle unter systemnahen Bedingungen zu untersuchen, können wir auch Peripherieaggregate wie Pumpen, Lüfter, Ventile ansteuern. Inhomogenitäten im Stack identifizieren wir belastbar über Einzelzellmonitoring mit Zellspannung und Zellimpedanzspektrum.

Darüber hinaus bieten wir Langzeittests von Peripherieaggregaten z. B. mit Wasserstoffbeaufschlagung und bei extremen Klimabedingungen an. Außerdem steht uns eine Unterdruckkammer für die Simulation von Höhen bis 6000 m zur Verfügung. Zellkomponenten sowie Werkstoffe untersuchen wir hinsichtlich ihrer elektrochemischen Beständigkeit mit Hilfe eines 3-Elektroden-Aufbaus sowie einer Elementanalyse im ICP-MS.

Ulf Groos, Thomas Jungmann, Christopher Hebling

2 *Langzeittest von Ventilen bei tiefen Temperaturen in der Klimaprüfzelle.*

GASTWISSENSCHAFTLER

Dr. Jong-Deok An

Konkuk University, Seoul, Korea, 4.3.2013–31.5.2013

Arbeitsgebiet: Organische Solarzellen

Dr. Hatem Bentaher

Higher Institute of Industrial Systems, Gabes, Tunesien,

1.7.2012–31.12.2013

Arbeitsgebiet: Solare Kühlung

Federica Carluccio

Università del Salento, Lecce, Italien, 15.4.2013–15.10.2013

Arbeitsgebiet: Modellierung von Sorptionswärmepumpen

Dr. Mete Cubukcu

Ege University, Solar Energy Institute, Izmir, Türkei,

2.5.2013–31.12.2013

Arbeitsgebiet: Qualitätssicherung für PV-Kraftwerke

Julius Denafas

Baltic Solar Energy, Vilnius, Litauen, 1.2.2012–31.1.2013

Arbeitsgebiet: Herstellung und Charakterisierung von Metallkontaktstrukturen

Karoline Fath

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland,

1.11.2010–31.10.2013

Arbeitsgebiet: Lebenszyklusanalyse von gebäudeintegrierten PV-Anlagen

Simon Fey

Hochschule Offenburg, Offenburg, Deutschland, 1.9.2011–31.7.2014

Arbeitsgebiet: Energie-Gateway

Prof. Dr. Benjamin Gonzalez-Díaz

Universidad de La Laguna, Teneriffa, Spanien, 1.4.2013–31.5.2013

Arbeitsgebiet: Silicium-Dünnschicht

Prof. Dr. Ricardo Guerrero-Lemus

Universidad de La Laguna, Teneriffa, Spanien, 1.8.2013–31.8.2013

Arbeitsgebiet: Silicium-Dünnschicht

Pedro Horta

University of Evora, Evora, Portugal, 5.2.2013–10.3.2013

Arbeitsgebiet: Konzentrierende Kollektoren

Dr. Eng. Skander Jribi

University of Gabes / University of Sfax, Gabes, Tunesien,

14.6.2013–15.9.2013

Arbeitsgebiet: Adsorption von Alkoholen und CO₂ an Aktivkohlen

Ankit Khanna

National University of Singapore, Solar Energy Research Institute of Singapore, Singapore, 18.3.2013–31.3.2014

Arbeitsgebiet: Metallisierung von Si-Wafer Solarzellen

Sunae Lee

Konkuk University, Seoul, Korea, 4.3.2013–5.4.2013

Arbeitsgebiet: Organische Solarzellen

Giuliana Leone

University of Palermo, Palermo, Italien, 1.9.13–31.12.13

Arbeitsgebiet: Entwicklung von solarthermischen Fassaden

AnYao Liu

Engineering Building, Australian National University, Alton, Australien, 21.10.2013–15.11.2013

Arbeitsgebiet: Analyse Defekte in mc Silicium

Prof. Dr. Louise Lomardo

Universidade Federal Fluminense, Niterói, Brasilien,

1.3.2013–31.8.2013

Arbeitsgebiet: Energieeffiziente Gebäude in tropischen Klimaten

Rodrigo Lopes Sauaia

Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, Brasilien, 1.12.2011–31.1.2013

Arbeitsgebiet: Laserstrukturierung mit LCP

Prof. Daniel Macdonald

College of Engineering and Computer Service, The Australian National University, Canberra, Australien, 13.5.2013–13.7.2013

Arbeitsgebiet: Charakterisierung von Verunreinigungen in Silicium

Francisco Jose Moralejo Vazquez

CIEMAT – Photovoltaic Unit, Madrid, Spanien, 1.9.2013–30.11.2013

Arbeitsgebiet: Bauwerksintegrierte PV

Daniel Neves Micha

University of Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasilien,

2.9.2013–31.8.2014

Arbeitsgebiet: GaAs Höchsteffizienz-Solarzellen

Dr. Amada Montesdeoca-Santana

Universidad de La Laguna, Teneriffa, Spanien, 1.1.2013–31.1.2013

Arbeitsgebiet: Kristalline Siliciumzellen

Said Ould Amrouche

Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER),

Algier, Algerien, 28.10.2013–26.11.2013

Arbeitsgebiet: Wechselrichter-Prüflabor

Salla Päivikki Repo

Aalto University, School of Electrical Engineering, Aalto, Finnland,

5.3.2012–31.5.2013

Arbeitsgebiet: Zusammenarbeit mit Charakterisierung und Technologie im Bereich Al_2O_3 , Black Silicon, Materialcharakterisierung

Prof. Beatriz Romero

Universidad Rey Juan Carlos, Madrid, Spanien, 15.7.2013–16.8.2013

Arbeitsgebiet: Organische Solarzellen

Dr. Eng. Alessio Sapienza

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR), Istituto di Tecnologia

Avanzate per l'Energia »Nicola Giordano« (ITAE), Messina, Italien, 7.6.2013–28.6.2013

Arbeitsgebiet: Experimentelle Charakterisierung der Kinetik von Adsorptionswärmeübertragern

Aran Solé i Garrigós

GREA Innovació Concurrent, Universitat de Lleida, Lleida, Spanien,

14.1.2013–17.4.2013

Arbeitsgebiet: Zyklusstabilität von Zuckeralkoholen als Latentwärmespeichermaterialien

Emmerich Tempfli

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe, Deutschland,

1.9.2013–31.12.2013

Arbeitsgebiet: Energieeffizienz, Adsorptionswärmepumpe, Wärmeübertragerentwicklung

Prof. Dr. Melkon Tatlier

Istanbul Technical University, Istanbul, Türkei, 1.10.2012–30.9.2013

Arbeitsgebiet: Energieeffiziente Gebäude

Richard Tuth

Badenova AG & Co. KG, Freiburg, Deutschland, ab 1.8.2013

Arbeitsgebiet: Bestimmung von Standardlastprofilen im Kontext erhöhter Anteile erneuerbarer Energien und Eigenstromoptimierung

Josip Vasilj

University of Split, Faculty of Electrical Engineering, Mechanical

Engineering and Naval Architecture, Split, Kroatien,

5.6.2013–3.7.2013

Arbeitsgebiet: SmartGrid

Prof. Mathias Wambsganß

Hochschule für Angewandte Wissenschaften, Fachhochschule

Rosenheim, Deutschland, 1.11.2012–1.3.2013

Arbeitsgebiet: Lichttechnik und Fassaden

Michiyo Yamane

Asahi Kasei Corporation, Advanced Energy Materials Development

Center, Fuji, Japan, 1.4.2013–31.3.2014

Arbeitsgebiet: Gebrauchsdaueranalyse von Polymerkomponenten für solare Systeme

Dr. Nada Zamel

University of Waterloo, Waterloo, Kanada, 1.10.2011–30.9.2014

Arbeitsgebiet: Wassermanagement und Brennstoffzellen

PROMOTIONEN

Monica Aleman

»Low temperature processes for the front-side metallization of crystalline silicon solar cells«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2013

Constanze Bongs

»Experimentelle und mathematisch-numerische Untersuchung von verdunstungsgekühlten, sorptiv beschichteten Wärmeübertragern für die Luftentfeuchtung und -kühlung«

Technische Universität Berlin
Berlin, 2013

Luisa Burhenne

»Fixed Bed Biomass Gasification. Experimental investigation and modeling for the optimization of a novel process for the production of a tar-free product gas«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2013

Sebastian Burhenne

»Monte Carlo Based Uncertainty and Sensitivity Analysis for Building Performance Simulation«

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Karlsruhe, 2013

Marion Drießen

»Chemisches Gasphasenätzen und laterales epitaktisches Überwachsen für kristalline Silicium-Dünnschichtsolarzellen«

Universität Konstanz
Konstanz, 2013

Arne Fallisch

»Fabrication, Characterization and Modelling of Emitter Wrap-Through Silicon Solar Cells«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2012

Johannes Giesecke

»Quantitative Recombination and Transport Properties in Silicon from Dynamic Luminescence«

Universität Konstanz
Konstanz, 2013

Hubert Hauser

»Nanoimprint lithography for solar cell texturisation«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2013

Henning Helmers

»Cogeneration of Photovoltaic Electricity and Heat Using Concentrated Solar Radiation«

Universität Oldenburg
Oldenburg, 2013

Thorsten Hornung

»Ein- und mehrstufige optische Konzentratoren für photovoltaische Anwendungen«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2013

Ulrich Jäger

»Selektive Laserdiffusion für hocheffiziente Solarzellen aus kristallinem Silicium«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2013

Vera Klinger

»Entwicklung von ultradünnen metamorphen Mehrfachsolarzellen zum Erreichen höchster Umwandlungseffizienzen«

Universität Konstanz
Konstanz, 2013

Philipp Löper

»Silicon Nanostructures for Photovoltaic«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2013

Jan Nievendick

»Kontrolle und Weiterentwicklung des Texturierungsprozesses für multikristalline Silizium-Solarzellen«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2012

Teresa Orellana Perez

»Mechanical Behavior of Alternative Multicrystalline Silicon for Solar Cells«

Technische Universität Bergakademie Freiberg
Freiberg, 2013

Tobias Roesener

»Hocheffiziente III-V-Mehrfachsolarzellen auf Silicium Substrat«

Universität Konstanz
Konstanz, 2013

Marc Rüdiger

»Analysis and Simulation of Crystalline Silicon Solar Cells«

Universität Konstanz
Konstanz, 2013

Matthias Schicktanz

»Dynamische Modellierung einer Adsorptionskälteanlage unter besonderer Berücksichtigung des Einflusses von Temperaturfluktuationen«

Technische Universität Berlin
Berlin, 2013

Simon Schwunk

»Partikelfilter zur Ladezustands- und Alterungsbestimmung bei Lithium-Ionen-Batterien auf Basis von Metalloxiden und Phosphorolivinen«

FernUniversität Hagen
Hagen, 2013

Johannes Seiffe

»Plasma-Based Surface Modification Technologies for Crystalline Silicon Photovoltaics«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2013

Wendelin Sprenger

»Electricity yield simulation of complex BIPV systems«

Technische Universität Delft
Delft, 2013

Mark Steiner

»Energy Yield and Power Output Modeling for Analysis of CPV Modules«

Universität Oldenburg
Oldenburg, 2013

Felix Florian Stelzl

»2-dimensionales Donator/Akzeptor-Modell für organische Solarzellen und experimentelle Untersuchungen mittels Nanoelektroden«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2013

Benjamin Thaidigsmann

»Entwicklung und Charakterisierung hocheffizienter MWT-PERC-Solarzellen aus p-dotiertem, kristallinem Silicium«

Eberhard Karls Universität Tübingen
Tübingen, 2013

Jochen Wirth

»Vergleich des Alterungsverhaltens verschiedener Dünnschichttechnologien in Photovoltaik-Modulen«

Universität Ulm
Ulm, 2012

MITGLIEDSCHAFT IN AUSGEWÄHLTEN GREMIEN

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg,
(BBA-BW), Vorstand

Bundesverband Energiespeicher (BVES), Präsident

Deutsche Elektrotechnische Kommission (DKE):

- Komitee 374 »Solarthermische Anlagen zur Stromerzeugung«

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e. V. (DWWV),

Energy Conservation Through Energy Storage Programme ECES:

- Heat Pump Programme HPP
- Solar Heating & Cooling Programme SHC

EU PV Technology Platform:

- WG3 »Science, Technology & Applications«
- WG4 »Developing Countries«

Europäisches Komitee für Normung (CEN):

- TC 312 / WG 1 / WG 2 / WG 3 »Solar Collectors« / »Factory Made Systems« / »Thermal Solar Systems and Components«

European Renewable Energy Research Centres Agency (EUREC)

European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA)
sowie Scientific Technical Committee

European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling
(RHC-platform), Präsident

Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien
(FGW) e. V.:

- Arbeitskreis »Photovoltaik«
- Arbeitskreis »TR3 – Elektrische Eigenschaften und Erzeugungseinheiten«
- Arbeitskreis »TR4 – Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen«

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE)

Fuel Cell Europe

German Scholars Organization (GSO), Präsident

International Advisory Committee of EUPVSEC

International Commission on Glass:

- TC-10 »Optical Properties and Characterization of Glass«
- International Commission on Illumination CIE
- TC3-39 »Discomfort Glare from Daylight in Buildings«
- TC3-47 »Climate-Based Daylight Modelling«

International Electrotechnical Commission IEC:

- TC-82 »Modules, non-concentrating«, WG2

International Energy Agency IEA:

- Solar Heating and Cooling Programme SHCP Task 39 »Polymeric Materials for Solar Thermal Applications«

Solar Cluster Baden-Württemberg e.V. , erweiterter Vorstand

Symposium Thermische Solarenergie, OTTI Technologie-Kolleg,
Wissenschaftlicher Beirat

VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung (VDI-TGA):

- Richtlinienausschuss 3789 »Energie und Umwelt«
- Richtlinienausschuss 4706 »Kriterien für das Innenraumklima«
- Richtlinienausschuss 4650, Blatt 1 und Blatt 2 »Wärmepumpen«
- Richtlinienausschuss 4645, »Planung und Dimensionierung von Wärmepumpen von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern«
- Richtlinienausschuss 2164 »Latentspeichersysteme«
- Richtlinienausschuss 6018 »Kälteversorgung in der TGA – Planung, Bau, Abnahmeprüfung, Betrieb, energetische Bewertung«

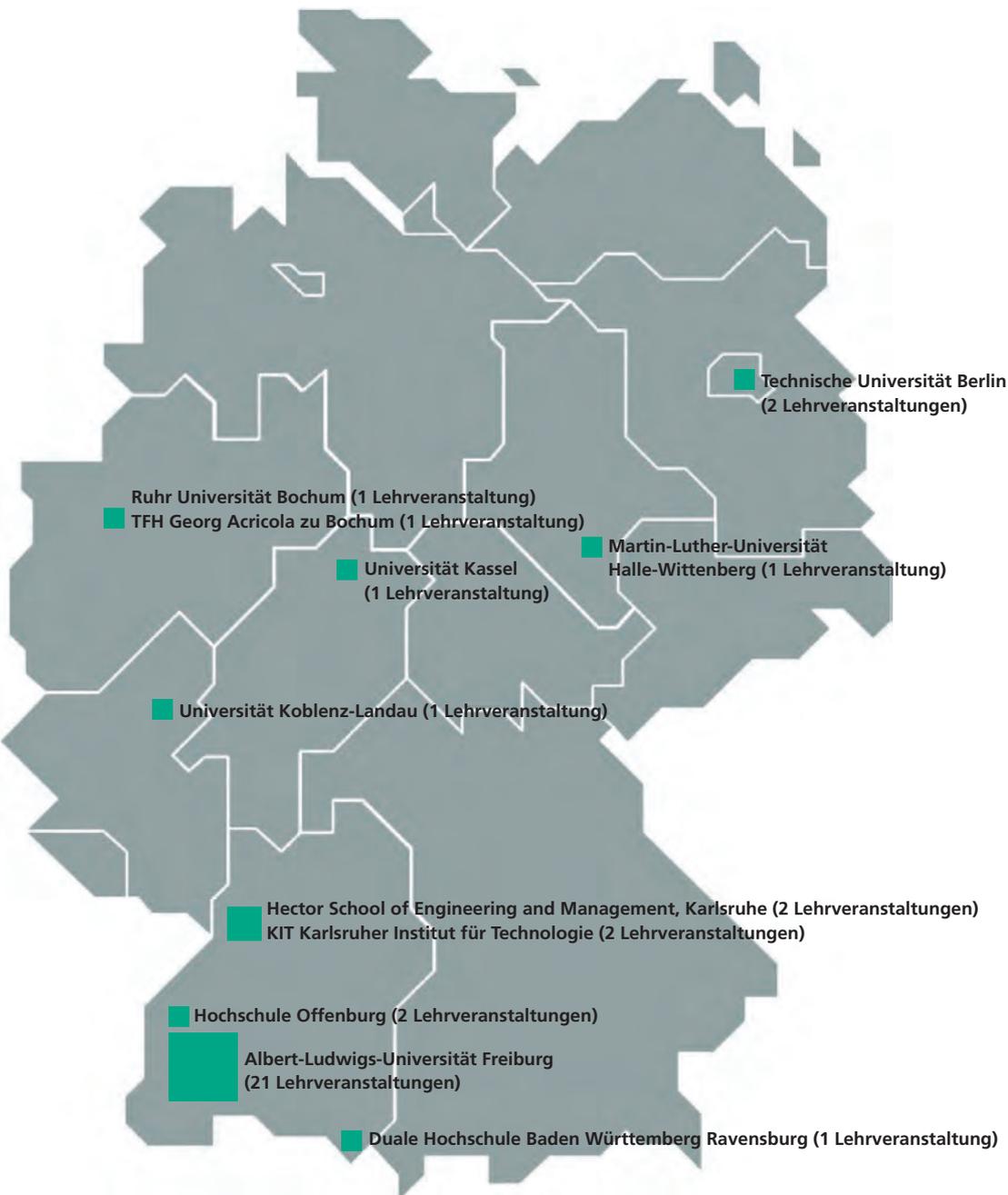
VDMA – The German Engineering Federation:

- Arbeitskreis 24247 »Energie-Effizienz Kälteanlagen«
- Productronics Association
- Deutsches Flachdisplay-Forum (DFF)
- Organic Electronics Association (OE-A)

Das Fraunhofer ISE ist auch in zahlreichen anderen
Gremien, Verbänden und Vereinigungen aktiv:
www.ise.fraunhofer.de/de/ueber-uns/gremien

LEHRVERANSTALTUNGEN

Das Fraunhofer ISE ist eng mit Universitäten, Fachhochulen und anderen Forschungseinrichtungen vernetzt. Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen des Fraunhofer ISE sind in verschiedenen Städten im akademischen Lehrbetrieb engagiert. Dadurch wird nicht nur Wissen und praktische Erfahrung an Studierende weiter gegeben. Die engen Verbindungen zur Lehre steigern auch die hohe Themenkompetenz des Instituts.



Eine genaue Übersicht über alle Lehrveranstaltungen, die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen des Fraunhofer ISE anbieten, findet sich im Internet: www.ise.fraunhofer.de/vorlesungen-seminare

ERTEILTE PATENTE

Farbstoffsensibilisierte photovoltaische Zelle, ein Verfahren zur Herstellung dieser photovoltaischen Zellen sowie deren Verwendung

Hinsch, Andreas; Kern, Rainer; Sastrawan, Ronald; Petrat, Frank Martin; Stützel, Burkhard; Schmidt, Friedrich Georg; Michael, Günther; Katusic, Stipan; Gutsch, Andreas
DE 102 49 246 B4

Anordnung mit Solarzelle und integrierter Bypass-Diode
Riesen van, Sascha; Löckenhoff, Rüdiger; Strobl, Gerhard; Dietrich, Ron; Koestler, Wolfgang
IL 183206

PKW-Klimaanlagen mit Adsorptionswärmepumpen
Henning, Hans-Martin; Mittelbach, Walter
KR 101 238 692 B1

Verfahren zur trockenchemischen Behandlung von Substraten sowie dessen Verwendung
Reber, Stefan; Willeke, Gerhard
US 8,569,175 B2

Wechselrichter mit integrierter Ansteuerung und Regelung für einen Tracker
Burger, Bruno; Lerchenmüller, Hansjörg
CA 2,671,962 C

Sonnenschutzvorrichtung mit winkelselektiver Transmission
Kuhn, Tilmann
JP 5350234 B2

Frontseitig serienverschaltetes Solarmodul
Löckenhoff, Rüdiger
EP 2 135 299 B1

Solarelement mit gesteigerter Effizienz und Verfahren zur Effizienzsteigerung
Goldschmidt, Jan Christoph; Löper, Philipp; Peters, Marius
US 8,507,790 B2

Textur- und Reinigungsmedium zur Oberflächenbehandlung von Wafern und dessen Verwendung
Mayer, Kuno; Schumann, Mark; Kray, Daniel; Orellana, Teresa Peres; Rentsch, Jochen; Zimmer, Martin; Kirchgäßner, Elias; Zimmer, Eva geb. Blazkow; Biro, Daniel; Rostas, Arpad Mihai
EP 2 229 431 B1

Verfahren zum Fertigen einer Silizium-Solarzelle mit einem rückgeätzten Emitter sowie entsprechende Solarzelle
Hahn, Giso; Haverkamp, Helge; Raabe, Bernd; Book, Felix; Dastgheib-Shirazi, Amir
US 8,586,396 B2

Steuerbare Umschaltvorrichtung für ein Solarmodul
Burger, Bruno; Schmidt, Heribert
CN 101821858 B, JP 5306362 B2

Thin-film solar cell and process for its manufacture
Mitchell, Emily; Reber, Stefan; Schmich, Evelyn
EP 2 071 632 B1

Verfahren zur Metallisierung von Solarzellen, Hotmelt-Aerosol-Tinte und Aerosol-Jet-Drucksystem
Hörteis, Matthias; Richter, Philipp; Glunz, Stefan
CN 101919063 B

Trennschaltung für Wechselrichter
Burger, Bruno; Schmidt, Heribert
JP 5303648 B2, KR 101314975 B1

Tandemsolarzelle aus kristallinem Silizium und kristallinem Siliziumcarbid sowie Verfahren zu dessen Herstellung
Janz, Stefan; Reber, Stefan
EP 2 351 108 B1

Heterosolarzelle und Verfahren zur Herstellung von Heterosolarzellen
Pysch, Damian; Glunz, Stefan
CN 102144303 B

Vorrichtung zur Verdampfung von flüssigen Kraftstoffen und brennbaren Flüssigkeiten, Verfahren zum Betreiben sowie Verwendungszwecke
Szolak, Robert; Susdorf, Alexander; Aicher, Thomas
DE 10 2010 012 945 B4

Verfahren zum Nachführen eines Solargenerators nach der Sonne, Steuerung für eine Solaranlage und Solaranlage
Burger, Bruno; Stalter, Olivier
CN 102422239 B

Mikroventil in keramischer Mehrlagentechnik sowie dessen Verwendung
Lenz, Bettina; Bromberger, Kolja
EP 2 340 386 B1

Abgasreinigungsvorrichtung, Verfahren zur Abgasreinigung, Katalysator sowie Pyrolysereaktor
Szolak, Robert; Susdorf, Alexander; Aicher, Thomas
DE 10 2010 049 957 B4

Aktiver Druckintensivierer, Umkehrosmose-Anlage und deren Verwendung
Went, Joachim; Anhalt, Julian
DE 10 2011 114 093 B4

Solarthermischer Kollektor
Henning, Hans-Martin; Dupeyrat, Patrick; Nunez, Tomas (†); Henninger, Stefan
DE 10 2011 112 974 B3

Verfahren und Vorrichtung zum lichtinduzierten oder lichtunterstützten Abscheiden von Metall auf einer Oberfläche eines Halbleiterbauelements sowie damit hergestelltes Halbleiterbauelement
Zimmer, Martin; Rentsch, Jochen; Savio, Christian; Könning, Clemens; Glunz, Stefan
DE 10 2012 214 925 B3

Method of forming a structure
Campe, Hilmar von; Schwirtlich, Ingo
JP 5 335 234 B2

Behälter zum Stapeln und Transportieren von Scheiben aus brüchigem Material
Warschatka, Andreas; Ries, Andreas
DE 10 2010 040 918 B4

Verfahren und Vorrichtung zur galvanischen Beschichtung von Substraten und Solarzellen
Lippert, Lothar; Caseday, Marcus; Reime, Sascha
DE 10 2010 042 642 B4

Photovoltaikmodule mit reduziertem Gewicht
Engelmann, Harry; Fliedner, Uwe; Nattermann, Kurt; Schwirtlich, Ingo
US 8,420,218 B2

Verfahren zur chemischen Behandlung eines Substrats
Teppe, Andreas; Schum, Berthold; Franke, Dieter; Schwirtlich, Ingo; Vaas, Knut; Schmidt, Wilfried
CN 102171798 B, EP 2 335 275 B1, US 8,563,440 B2

Method for producing a metal contact on a semiconductor substrate provided with a coating
Ernst, Ingrid; Schubert Gunnar; Horzel, Joerg; Roth, Peter; Dauwe, Stefan; Droste, Tobias; Schmidt, Wilfried
US 8,481,419 B2

Verfahren zur Herstellung von Wafern
Peip, Michael
DE 10 2008 037 653 B4

Wärmeisolationsanordnung mit variablem Wärmeisolationsvermögen und deren Verwendung sowie Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von ein- oder multikristallinen oder glasigen Materialien
Buellesfeld, Frank; Sahr, Uwe; Tittel, Andreas
EP 2 304 365 B1

Verfahren und Vorrichtung zum Führen eines Sägedrahtes
Berg, Michael; Bussemer, Beate; Loeber, Andreas; Martin, Rolf; Menzel, Andreas
DE 10 2011 055 006 B4

Verfahren zum Weiterverarbeiten und/oder Rezyklieren von Material
Buss, Werner; Campe Hilmar von; Schwirtlich, Ingo; Seidl, Albrecht
EP 2 141 121 B1, JP 5209507 B2

Verfahren und Vorrichtung zur galvanischen Beschichtung von Substraten
Lippert, Lothar; Dauwe, Stefan
DE 10 2009 029 551 B4

IMPRESSUM

Redaktion

Christina Lotz, Karin Schneider (Leitung)
Presse und Public Relations

Bildnachweise

*Belectric, Rolf Disch SolarArchitektur, Fraunhofer-Gesellschaft,
Fraunhofer ISE, FWTM Freiburg, Kuwait Institute for Scientific
Research, ModQS, Pixelio, Ryan Carter / Crown Prince
Court – Abu Dhabi*

Fotografen

*Adnan Al-Akori S. 97, Abb. 2; Michael Eckmann S. 39, S. 102/104,
S. 105, S. 106, S. 111, S. 144, Abb. 1; Sven Ehlers S. 113;
Thomas Ernsting S. 127, Abb. 2, S. 142; Matthias Heyde S. 1, S. 8/9;
Myriam Kaiser S. 139; Guido Kirsch S. 13, S. 16/18, S.19, Abb. 2,
S. 20, Abb. 2, S. 21, S. 73, Abb.1; Thomas Klink S. 54/56, S. 58;
Dirk Mahler S. 49, Abb.1; Maria Parussel und Holger Vonder Titel,
S. 132, Abb.1; Joscha Rammelberg S. 88/90/92, S. 91, S. 93,
S. 108/110, S. 120, S. 134/137, S. 147, Abb. 2; Daniel Schoenen S. 141;
Thies Stillahn S. 94/96; S. 98, Abb.1; Rainer Sturm S. 122/124;
Alexander Wekkeli S. 46/48, S. 49, Abb. 2*

Gestaltung und Druck

www.netsyn.de, Joachim Würger, Freiburg

Anschrift der Redaktion

*Fraunhofer-Institut für
Solare Energiesysteme ISE
Presse und Public Relations
Heidenhofstr. 2
79110 Freiburg
Telefon +49 761 4588-5150
Fax +49 761 4588-9342
info@ise.fraunhofer.de
www.ise.fraunhofer.de*

Bestellung von Publikationen bitte per E-Mail.

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien

*© Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Freiburg, 2014*

VERANSTALTUNGEN 2014
MIT BETEILIGUNG DES FRAUNHOFER ISE

10. SiliconFOREST Workshop, Feldberg-Falkau,
23.–26.2.2014

Photovoltaic Module Reliability Workshop (PVMRW),
Golden, USA, 25.–27.2.2014

Battery Expo und Fuel Cell Expo, Tokio, Japan,
26.–28.2.2014

6. Forum Bauwerkintegrierte Photovoltaik (OTTI),
Kloster Banz, Bad Staffelstein, 11.3.2014

KONGRESS-Forum ElektroMobilität, Berlin, 11.–12.3.2014

29. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI),
Kloster Banz, Bad Staffelstein, 12.–14.3.2014

Energy Storage, Düsseldorf, 25.–27.3.2014

7. Entwicklerforum Akkutechnologien, Battery University,
Aschaffenburg, 26.–27.3. 2014

4th International Conference on Crystalline Silicon
Photovoltaics and PV Workshop, 's-Hertogenbosch,
Niederlande, 25.–28.3.2014

ISHPC 2014 International Sorption Heat Pump Conference,
Maryland, USA, 31.3.–3.4.2014

CPV-10, Albuquerque, USA, 7.–9.4.2014

Hannover Messe, Hannover, 7.–11.4.2014

2014 MRS Spring Meeting & Exhibit, San Francisco, USA,
21.–25.4.2014

24. Symposium Thermische Solarenergie (OTTI),
Kloster Banz, Bad Staffelstein, 7.–9.5.2014

11th IEA Heat Pump Conference, Montreal, Kanada,
12.–16.5.2014

8th SNEC PV POWER EXPO 2014, Shanghai, China,
20.–22.5.2014

PCIM Europe, Nürnberg, 20.–22.5.2014

Eurotherm Seminar N°99, Advances in Thermal Energy
Storage, Lleida, Spanien, 28.–30.5.2014

Intersolar Europe, München, 2.–6.6.2014

40th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Denver, USA,
8.–13.6.2014

5. International Flow Battery Forum IFBF, Hamburg,
1.–2.7.2014

Intersolar North America, San Francisco, USA, 7.–10.7.2014

The Battery Show, Novi, Detroit, USA, 16.–18.9.2014

20th SolarPACES, Peking, China, 16.–19.9.2014

29th EUPVSEC, Amsterdam, Niederlande, 23.–25.9.2014

f-cell, Stuttgart, 6.–8.10.2014

6. Internationale Leitmesse für Elektro- & Hybrid-Mobilität
eCarTec, München, 21.–23.10.2014

SHC Conference, Peking, China, 27.–29.10.2014

Deutsche Kälte- und Klimatagung, Düsseldorf,
19.–21.11.2014

WCPEC-6, Kyoto, Japan, 23.–27.11.2014