



Fraunhofer

ISE

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE



JAHRESBERICHT
2010

Titelfoto:

Blick in die Shed-Dach-Konstruktion des Atriums im Fraunhofer ISE. Die dort integrierten Solarstrommodule sind in die Isolierverglasung eingepasst. Neben dem Wärmeschutz im Winter dienen sie in der heißen Jahreszeit auch als Sonnenschutz. Mit dem damaligen Institutsneubau des Fraunhofer ISE (2001) wurde ein Gebäude realisiert, das unter dem Motto »Vorbildliches Bauen mit der Sonne« Architektur und Solartechnik in beispielhafter Weise miteinander verbindet. Hohe Arbeitsplatzqualität und effiziente Energienutzung unter selbstverständlicher Integration von Solarsystemen waren die gemeinsame Zielsetzung des Bauherren, der Architekten Dissing+Weitling aus Kopenhagen, des Ingenieurbüros Rentschler & Riedesser aus Stuttgart sowie der Fachplaner des Fraunhofer ISE.

VORWORT



2010 wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) zum »Jahr der Energie« ernannt. Das Thema »Zukunft der Energie« zog sich wie ein roter Faden durch die öffentlichen Veranstaltungskalender. Auch das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE organisierte zusammen mit der Fraunhofer-Allianz Energie einen erfolgreichen Beitrag, die Fraunhofer-Energietage am 23. und 24. September 2010 in Berlin. Rund 200 Redner und Gäste – darunter der ehemalige Bundesumweltminister sowie derzeitige Executive Director des Institute for Advanced Sustainability Studies Prof. Klaus Töpfer – widmeten sich in Beiträgen und Diskussionen dem »Energiekonzept Deutschland – Mit neuer Energie«. Diese Energietage zeigten, dass die Fraunhofer-Gesellschaft mit ihren in der Fraunhofer-Allianz Energie gebündelten Instituten eine führende Stellung auf dem Gebiet der regenerativen Energien und Energieeffizienztechnologien in Deutschland hat.

Die erneuerbaren Energien bestimmten 2010 in Deutschland auch die politische Agenda, das Fazit war jedoch nicht nur positiv: So legte die Bundesregierung zwar ein Energieprogramm mit ehrgeizigen Zielen vor, die Laufzeitverlängerung für Atomkraftwerke jedoch hat zur Folge, dass wegen Überproduktion der erneuerbar produzierte Strom nicht vollständig ins Netz eingespeist werden kann. Zudem ist für die 2011 anstehende Novellierung des Erneuerbare-Energien-Gesetzes (EEG) zu befürchten, dass interessierte Kreise durch Verschlechterung wesentlicher Elemente die Photovoltaik auszubremsen versuchen. Das Fraunhofer ISE hat mit seiner Stabsstelle Energiepolitik und in seiner Eigenschaft als Mitglied des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien (FVEE) an einer Studie und einem Eckpunktepapier für eine Vollversorgung Deutschlands mit erneuerbaren Energien bis 2050 mitgewirkt, die Mitte des Jahres an Bundesumweltminister Röttgen überreicht wurden. Auch zum Energieforschungsprogramm der Bundesregierung haben wir gemeinsam mit dem FVEE Empfehlungen ausgearbeitet. Im Auftrag des Bundesumweltministeriums koordiniert das Fraunhofer ISE eine Studie zur Entwicklung einer integrierten Wärme- und Kältestrategie für Deutschland. Hierzu werden szenariengestützt die Entwicklungen des Wärme- und Kälte-

markts unter Berücksichtigung von Maßnahmen der Bundesregierung abgebildet und Handlungsempfehlungen abgeleitet, um eine beschleunigte Reduktion des Verbrauchs und eine steigende Deckung durch erneuerbare Energien zu erreichen.

Auf dem internationalen Parkett standen die Folgen der Klimaveränderung und der dringend notwendige Energiewandel ebenfalls im Fokus. In der mexikanischen Stadt Cancún verständigten sich die Teilnehmer der Weltklimakonferenz überraschend auf einen Kompromiss. Die Fraunhofer-Gesellschaft wurde Mitglied der Desertec Industrial Initiative, deren Ziel es ist ein internationales Stromnetz für Sonne und Wind voranzutreiben. Der Umstieg auf die effizientere Nutzung von zunehmend erneuerbaren Energien stellt ein gewaltiges, globales Konjunkturprogramm dar, das zahlreiche Arbeitsplätze schaffen wird. Allein in Deutschland kann man 2010 fast einen ganzen Prozentpunkt unseres Bruttoinlandsprodukts den Erneuerbaren zurechnen.

Auch die positive wirtschaftliche und personelle Entwicklung des Fraunhofer ISE hat sich 2010 fortgesetzt: Unser Betriebshaushalt konnte um 12 Prozent auf mehr als 53 Mio. Euro (61 Mio. mit Investitionen) steigen. Unsere Belegschaft haben wir auf über 1000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter erweitert. Damit stehen wir im internationalen Vergleich ganz ausgezeichnet da. Um unter diesen Vorzeichen als größtes Solarforschungsinstitut Europas auch in Zukunft weiter zu wachsen, haben wir folgende wegweisende Schritte unternommen:

Unserer erstmals vierstelligen Mitarbeiterzahl wollen wir auch räumlich gerecht werden. Daher erfolgte 2010 der Spatenstich für ein neues Laborgebäude. In unmittelbarer Nähe zum Hauptsitz des Instituts in Freiburg wird bis 2012 ein Laborgebäude mit über 4000 m² Nutzfläche entstehen. Hier werden zukünftig auf 2000 m² Labor- und Versuchsfläche die Forschungsgruppen für Materialforschung und Beschichtungen sowie für mikrostrukturierte Oberflächen untergebracht sein. Bund und Land übernehmen zu gleichen Teilen die Kosten des Laborneubaus in Höhe von 10,2 Millionen Euro, die Teil meiner

Berufungszusage waren. Hierfür an dieser Stelle nochmals unser ausgesprochen Dank.

In weiterer Anpassung unserer Struktur an zukünftige Aufgaben haben wir 2010 außerdem zwei seit vielen Jahren am Fraunhofer ISE bearbeitete Forschungsthemen – Solarthermie und Modultechnologie – in eigenständige Abteilungen überführt. Die Abteilung »Solarthermie und Optik« wird von Dr. Werner Platzer geleitet, die Abteilung »Photovoltaische Module, Systeme und Zuverlässigkeit« von Dr. Harry Wirth.

Die wissenschaftliche Arbeit unserer Forscherinnen und Forscher wurde auch 2010 wieder mit zahlreichen Preisen und Auszeichnungen belohnt (s. S. 12):

Ein Forschungsthema wurde gleich mehrfach preisgekrönt. Die Mehrfachsolarzellen aus III-V Halbleitern, mit denen wir Anfang des Jahres 2009 einen Wirkungsgrad von 41,1 Prozent – damals Weltrekord – erzielten, wurden 2010 national und international von mehreren Institutionen ausgezeichnet. Allen voran erhielten Dr. Andreas Bett und Dr. Frank Dimroth für die erfolgreiche Arbeit mit ihrer Gruppe an hocheffizienten Solarzellen für die Konzentrator-Technologie den Joseph-von-Fraunhofer Preis. Wir freuen uns, dass wir die höchste Auszeichnung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft damit erstmals am Fraunhofer ISE entgegen nehmen durften. Mit besonderem Stolz erfüllt uns die Verleihung des Preises der Fondation Louis D. an Dr. Frank Dimroth. Der mit 750 000 Euro höchst dotierte französische Wissenschaftspreis wurde im Juni im Institut de France in Paris überreicht. In Brüssel wurden die Forschungsergebnisse zur Konzentrator-Photovoltaik zudem mit dem EARTO-Innovationspreis ausgezeichnet. Dr. Hans-Martin Henning erhielt einen Ruf auf eine W3-Professur »Klima-Engineering« an die Hochschule für Technik, Stuttgart, den er ablehnte. Auch die Exzellenzzulagen der Fraunhofer-Gesellschaft für 2011 möchte ich gerne erwähnen. Sie gingen an Dr. Dietmar Gerteisen, Dr. Thomas Schlegl, Gerhard Stryi-Hipp und Dr. Wilhelm Warta.

Als Juryvorsitzender der »Solar for All Initiative« konnte ich 2010 persönlich die Preisträger des gleichnamigen Wettbewerbs küren. Auf der Inter Solar North America in San Francisco wurde der Greenlight Planet Inc. der 1. Preis überreicht. Das Unternehmen vermarktet solarbetriebene LED-Leuchten in einkommensschwachen, entlegenen Gegenden und kombiniert dabei modernste Technologie mit innovativen Vertriebsnetzen.

Aber nicht nur zahlreiche Preise, auch ein Jubiläum, den Start von Kooperationen und die Eröffnung mehrerer neuer Labor-einrichtungen konnten wir 2010 feiern:

In Nordrhein-Westfalen feierte unser Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen sein 10jähriges Jubiläum. 2000 gingen wir an diesem Standort, mit Unterstützung der nordrhein-westfälischen Landesregierung, an den Start. Ziel war es, beispielhafte Rahmenbedingungen für industrienaher Forschung nahe beim Kunden zu schaffen. Nach zehn erfolgreichen Jahren konnten wir mit dem Leiter, Dr. Dietmar Borchert, am 5. November 2010 Jubiläum feiern und zu diesem Anlass ein rund 400 m² großes Technologielabor für Silicium-Heterosolarzellen und Silicium-Dünnschichtsolarzellen in Betrieb nehmen. Im Norden Deutschlands fand eine Festveranstaltung anlässlich der engen Kooperation mit »Dispatch Energy« statt. Das Unternehmen in Itzehoe hat in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE und ISIT ein Batteriekomplettsystem entwickelt, das die Zwischenspeicherung und Eigennutzung von dezentral erzeugtem Solarstrom zu wirtschaftlichen Konditionen möglich macht. Am gleichen Tag fand einige Hundert Kilometer weiter südlich die Einweihung des Energieparks Dürbheim statt. Dort ging eine 5 Megawatt Photovoltaikanlage an den Start, für die wir das Monitoring übernehmen und im Bereich großer Wechselrichter und Netzintegration forschen werden.

In Albuquerque in New Mexico, einem der sonnenreichsten Staaten der USA, legten wir gemeinsam mit dem Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE, Boston, sowie



1



2

dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut und der Canadian Standards Association (CSA)-Gruppe den Grundstein für ein internationales Test- und Zertifizierungslabor für Photovoltaik-Module. Das CFV Solar Test Laboratory ergänzt die bereits bestehenden Joint Venture-Standorte Freiburg und Singapur, letzteres in Kooperation mit dem Solar Energy Research Institute of Singapore SERIS. Mit allen drei Einrichtungen tragen wir zur Qualitätssicherung von PV-Modulen bei.

Vor Ort in Freiburg haben wir für unsere Forschungsarbeiten im Bereich hocheffizienter Siliciumsolarzellen – Charakterisierung und Simulation, hocheffiziente Zelltechnologien, innovative Prozesse und Konzepte – unter dem Namen ETALab unsere bestehenden Labore durch eine 450 Quadratmeter großen Technologiehalle ergänzt. Schwerpunkte sind hierbei die Kalibrierung von Solarzellen und neuartige Laser- und Metallisierungsprozesse. In unserem neuen Megawattlabor können wir nun Wechselrichter bis zu einer Leistung von 1,25 Megawatt entwickeln und betreiben. Das neue Leistungselektroniklabor ermöglicht auch die hochpräzise Vermessung von Wechselrichtern und die Durchführung aller Prüfungen nach den neuen Mittelspannungsrichtlinien. Mit dem Smart Energy Lab bietet das Fraunhofer ISE seit 2010 eine ideale Plattform für die Entwicklung und Evaluation von Energiemanagementlösungen an. Das Labor ist für die Analyse, Bewertung und Entwicklung von Smart Homes und Smart Grid-Technologien ausgestattet. Im Bereich Brennstoffzellenentwicklung konnten wir die Entwicklungsarbeiten an unserer 50-Kanal Impedanzspektroskopie-Anlage abschließen. Mit dieser weltweit einmaligen Anlage können nun in 50 vollständig getrennten Kanälen elektrochemische Reaktionen, Transportvorgänge, Ladungsträger- und Wärmeverteilung sowie Degradationseffekte orts aufgelöst analysiert und mit Simulationen dieser Vorgänge verglichen werden.

Neben den Fraunhofer-Energietagen haben wir 2010 zum dritten Mal in Folge die Solar Summits veranstaltet, sie fanden vom 13. bis 15. Oktober 2010 im Konzerthaus Freiburg statt.

1 Prof. Dr. Eicke R. Weber begrüßt Dorika Fleissner als 1000. Mitarbeiterin am Fraunhofer ISE.

2 Spatenstich für das neue Laborgebäude: Prof. Dr. Hans-Jochen Schiewer, Rektor der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Ministerialdirigent Dr. Dietrich Nelle, Leiter der Unterabteilung Forschungsorganisationen, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Prof. Dr. Eicke R. Weber, Institutsleiter Fraunhofer ISE, Ministerialdirektor Klaus Tappeser, Amtschef des Wissenschaftsministeriums Baden-Württemberg, Otto Neideck, Erster Bürgermeister der Stadt Freiburg, Veronika Reisser und Georg Brechensbauer, beide BMBW Architekten BDA + Partner, Markus Scheben, Abteilungsleiter Bauangelegenheiten/Liegenschaften, Fraunhofer-Gesellschaft (v.l.n.r.).

Die Konferenz widmete sich dem Thema der nachhaltigen Mobilität basierend auf regenerativ erzeugtem Strom und Wasserstoff sowie dem Einsatz und Potenzial nachwachsender Biokraftstoffe. Der Solar Summit 2011 wird sich dem Thema Organische Elektronik und Photovoltaik widmen. Erstmals wird vom 17. bis 20. April 2011 die »SiliconPV – International Conference on Silicon Photovoltaics« in Freiburg stattfinden. Es freut uns sehr, dass wir die Auftaktveranstaltung der neuen Konferenzreihe zum Thema »Fortgeschrittene Zell- und Modulkonzepte« – und mit ihr zahlreiche renommierte Vertreter aus Wissenschaft und Industrie – in Freiburg zu Gast haben werden.

Abschließend gilt mein Dank unseren Kuratoren und Stipendengebern, unseren Ansprechpartnern in den Ministerien auf Bundes- und Länderebene sowie bei den Projektträgern, ganz besonders unseren Industriepartnern. Sie haben uns auch 2010 kontinuierlich gefördert und maßgeblich unterstützt. Die langjährige, vertrauensvolle Zusammenarbeit ist für uns eine besondere Auszeichnung und Motivation, uns auch 2011 100prozentig für 100 Prozent erneuerbare Energien einzusetzen.

INHALTSVERZEICHNIS

- 6 Organisationsstruktur
- 8 Das Institut im Profil
- 10 Fraunhofer CSE
- 11 FuE-Höhepunkte
- 12 Ehrungen und Preise
- 14 Kuratorium

- 16 ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE UND GEBÄUDETECHNIK**
 - 20 Komponenten und Konzepte zur Solarenergie-nutzung an der Fassade
 - 21 Gebäudeintegrierte PV im Spitzencluster Solarvalley Mitteldeutschland
 - 22 Energetische Sanierung eines Wohnhochhauses in Freiburg
 - 23 Exergetisches Monitoring für Gebäude mit Erdwärmennutzung
 - 24 Latentwärmespeicher in zentralen Lüftungssystemen
 - 25 Adsorberentwicklung für Adsorptionswärmepumpen und Kältemaschinen
 - 26 Neue Sorptionsmaterialien: Synthese und erweiterte Charakterisierung
 - 28 Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im kleinen Leistungsbereich
 - 29 Wärmepumpenanlagen im Feldtest: Analyse der Systeme in der Praxis
 - 30 Modell zur Optimierung des visuellen Komforts in Bürogebäuden
 - 31 Alterungsuntersuchung von Polymermaterialien in PV-Modulen

- 32 ANGEWANDTE OPTIK UND FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN**
 - 36 Energieeinsparung durch Antibeslagbeschichtung bei Kühlmöbeln
 - 37 Korrosionsmechanismus von Low-E Schichten mit Silber als IR-Reflektor
 - 38 Mikrostrukturen für adhäsive Oberflächen
 - 40 Siliciumtexturierung am laufenden Band

- 42 SOLARTHERMIE**
 - 46 Optimierter photovoltaisch-thermischer Hybridkollektor
 - 47 Solarkollektoren mit bionischem FraCoTherm®-Absorber
 - 48 Solare Prozesswärme – Kollektorentwicklung und Anlagenmonitoring
 - 49 Solarthermische Meerwasserentsalzung
 - 50 Charakterisierung neuer Spiegelmaterialien für Parabolrinnenkollektoren
 - 51 Labor für solarthermische Polygeneration in Betrieb

- 52 SILICIUM-PHOTOVOLTAIK**
 - 56 Kristallisationsentwicklung für multikristallines Silicium
 - 57 Auf dem Weg zu hocheffizienten epitaktischen Waferäquivalenten
 - 58 Labor für Kristallisationstechnologie am Fraunhofer CSP in Halle
 - 60 Qualitätsbewertung von multikristallinen Siliciumwafern
 - 61 Waferidentifikation mittels Data Matrix Codes
 - 62 Simulation der Eisenkonzentration in Siliciumsolarzellen
 - 63 Hocheffiziente siebgedruckte n-Typ Rückseitenkontaktsolarzellen
 - 64 Kupferbasierte Kontakte für Siliciumsolarzellen
 - 65 Solarzellen mit Laser Chemical Processing (LCP) selektiven Emittieren
 - 66 MWT-PERC: Unser neues Konzept für industriennahe Rückkontaktzellen
 - 67 TOPAS: Beidseitig oxid-passivierte und lokal laserdiffundierte Solarzellen
 - 68 Sub- μm Auflösung zur Bestimmung von Rekombination und Dotierung
 - 70 Rückseitenpassivierung für Siliciumsolarzellen mittels Aluminiumoxid
 - 71 Industrielle Umsetzung hocheffizienter n-Typ Solarzellen

- 72 Hocheffiziente Siliciumsolarzellen mit Heteroübergang
- 73 Linienoptimierung und Prozesstransfer
- 74 10 Jahre Fraunhofer ISE Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen
- 75 TPedge: Kostensenkung durch randversiegelte Solarmodule

- 76 ALTERNATIVE PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIEN**
- 80 Ultra-dünne Mehrfachsolarzellen aus III-V Verbindungshalbleitern
- 81 CONTEC – Concentrator Technology & Evaluation Center
- 82 Aufskalierung von Farbstoff- und organischen Solarzellen
- 84 Hochkonversion – niederenergetische Photonen nutzbar machen
- 85 Mit Fluoreszenzkonzentratoren diffuses Licht konzentrieren

- 86 REGENERATIVE STROMVERSORGUNG**
- 90 CPV-Inselsystem zur Wasserversorgung in Ägypten
- 91 Entwicklung von Testmethoden und Untersuchungen an PV-Leuchten
- 92 Intelligente Vermarktung von Strom aus dezentralen Energiequellen
- 93 Smart Energy Lab für thermische und elektrische Gebäudeenergiesysteme
- 94 Präzise Leistungsmessungen an PV-Generatoren im Feld
- 95 PV-Kraftwerke: Stabile Performance über viele Jahre
- 96 Megawattlabor für Zentralwechselrichter
- 98 Batteriesysteme für automobiler und stationäre Anwendungen
- 100 Perspektiven der Elektromobilität
- 101 Intelligente Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge

- 102 WASSERSTOFFTECHNOLOGIE**
- 106 50-Kanal-Impedanz-Spektroskopie für Brennstoffzellen und Stapel
- 107 Prüf- und Zertifizierungslabor für Brennstoffzellensysteme
- 108 Hochtemperatur-Membranbrennstoffzelle für portable Anwendungen
- 109 H₂-Erzeugung durch Elektrolyse aus erneuerbaren Energien
- 110 Simulationsgestützte Auslegung von Zellstapeln für Redox-Flow-Batterie
- 111 Entschwefelung von Reformer-Produktgasen mittels Zinkoxid
- 112 Regenerierung von Rußpartikelfiltern mit Kraftstoffdampf und Synthesegas

- 114 SERVICEBEREICHE**
- 118 Kalibrieren von Solarzellen nach internationalen Standards
- 119 Kalibrierung von PV- und Konzentratormodulen
- 120 Kapazitäten für Tests und Zertifizierung von PV-Modulen ausgebaut
- 121 Prüfen und Mitgestalten am Testlab Solar Thermal Systems
- 122 Vermessung von Fassaden und transparenten Bauteilen
- 123 Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken
- 124 Charakterisierung und Tests von Batterien und Batteriesystemen
- 125 Charakterisierung und Tests von Beleuchtungssystemen
- 126 Teststandkapazitäten für Wärmepumpen und Verdampfer

- 127 ANHANG**



Andreas Bett



Gerhard Willeke



Karin Schneider



Gerhard Stryi-Hipp



Ralf Preu



Stefan Glunz



Thomas Schlegl

ORGANISATIONSTRUKTUR

Die Organisationsstruktur des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE basiert auf zwei parallel verlaufenden, sich wechselseitig ergänzenden Komponenten: den wissenschaftlichen Abteilungen und den Geschäftsfeldern. Die wissenschaftlichen Abteilungen des Instituts sind für die Forschung und Entwicklung (FuE) in den Labors, die Projektarbeit und die konkrete Arbeitsorganisation entscheidend. Der Großteil der Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus den Bereichen Wissenschaft und Technik ist in den wissenschaftlichen Abteilungen tätig. Die Außendarstellung unseres Instituts, unsere Marketingaktivitäten im Bereich FuE und vor allem unsere Strategieplanung orientieren sich an den sieben Geschäftsfeldern, die die inhaltlichen Schwerpunkte unserer Forschungstätigkeiten widerspiegeln.



INSTITUTSLEITUNG

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

STELLVERTRETENDE INSTITUTSLEITUNG

Dr. Andreas Bett +49 761 4588-5257
 Dr. Hans-Martin Henning +49 761 4588-5134

WISSENSCHAFTLICHE ABTEILUNGEN

Thermische Anlagen und Gebäudetechnik 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

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

DAS INSTITUT IM PROFIL

Kurzportrait

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. Hierzu entwickelt das Institut Materialien, Komponenten, Systeme und Verfahren in den Geschäftsfeldern: Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik, Angewandte Optik und funktionale Oberflächen, Solarthermie, Silicium-Photovoltaik, Alternative Photovoltaik-Technologien, Regenerative Stromversorgung und Wasserstofftechnologie. Über die Grundlagenforschung hinaus beschäftigt sich das Institut mit der Entwicklung von Produktionstechniken und Prototypen sowie der Ausführung von Demonstrationsanlagen und dem Betrieb von Testzentren. Das Institut plant, berät, prüft und stellt Know-how und technische Ausrüstung für Dienstleistungen zur Verfügung. Seit März 2001 ist das Fraunhofer ISE nach DIN EN ISO 9001:2000 zertifiziert.

Forschungs- und Dienstleistungsangebot

Das Fraunhofer ISE ist Mitglied der Fraunhofer-Gesellschaft, die sich als Mittler zwischen universitärer Grundlagenforschung und industrieller Praxis versteht und anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft betreibt. Das Fraunhofer ISE finanziert sich zu über 90 Prozent durch Aufträge in den Bereichen angewandte Forschung, Entwicklung und Hochtechnologie-Dienstleistungen. Kennzeichnend für seine Arbeitsweise sind der Praxisbezug und die Orientierung am Kunden. Das Institut ist in nationale und internationale Kooperationen eingebunden, es ist u. a. Mitglied des Forschungsverbands Erneuerbare Energien (FVEE) und der European Renewable Energy Research Centres (EUREC) Agency. Das Institut kann auf die Kompetenz anderer Fraunhofer-Institute zurückgreifen und so interdisziplinäre Komplettlösungen erarbeiten.

Vernetzung Fraunhofer-Gesellschaft

- Mitglied der Fraunhofer-Allianzen Bau, Energie, Nanotechnologie, Optic Surfaces, Photokatalyse und SysWasser
- Mitglied der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität
- Mitglied im Fraunhofer-Themenverbund »Werkstoffe, Bauteile – (MATERIALS)«

Internationale Auftraggeber und Kooperationspartner

Das Fraunhofer ISE arbeitet seit Jahren mit internationalen Kooperationspartnern und Auftraggebern erfolgreich zusammen. Eine Auflistung unserer Partner im In- und Ausland finden Sie unter www.ise.fraunhofer.de/ueber-uns/partner.

Außenstandorte und Kooperationen

Das seit 2000 bestehende Labor- und Servicecenter LSC in Gelsenkirchen ist über die Landesgrenzen von NRW hinaus Partner für die Photovoltaik-Industrie. Solarzellenhersteller nutzen die Dienstleistung des LSC für die Qualitätskontrolle ihrer Produktion ebenso wie für kurzfristige Problemlösungen in der Prozesslinie. Das Angebot des Labors umfasst die Simulation und Optimierung von Durchlaufprozessen, die Entwicklung neuer Prozesse und Strukturen für Solarzellen sowie die Erforschung großflächiger Heterosolarzellen aus amorphem und kristallinem Silicium. Das LSC Gelsenkirchen führt auch Trainings im Bereich Charakterisierungsverfahren und Solarzellentechnologie durch. 2010 feierte der Standort sein 10jähriges Jubiläum. Zu diesem Anlass wurde auch ein neues Labor für großflächige Si-Heterosolarzellen und Si-Dünnschicht solarzellen in Betrieb genommen (s. Beitrag S. 74).

2007 wurde das Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP in Halle/Saale gemeinsam von dem Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg und Halle, und dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE gegründet. Das Fraunhofer IWM bringt sein Know-how auf dem Gebiet der Optimierung und Bewertung von Silizium-Prozesstechnologien und Modulintegration mit ein. Das Fraunhofer ISE bietet seine

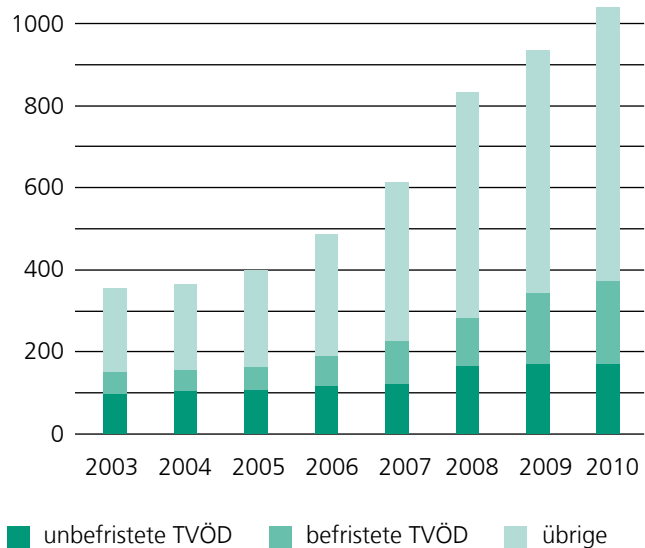
Kompetenzen in der Materialherstellung, Solarzellen- und Modulentwicklung sowie Charakterisierung an (s. Beitrag S. 58). Zentrale Einrichtungen sind heute der Bereich »Zuverlässigkeit und Technologien für Netzparität« (CSP-ZTN) und das »Labor für Kristallisationstechnologie« (CSP-LKT). Am 1. Oktober 2010 wurde der Grundstein für einen Neubau des Fraunhofer CSP gelegt.

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. Darüber hinaus bietet es Dienstleistungen für die laufende Produktion der Industriepartner im Bereich Analytik, Charakterisierung und Test an.

Das 2008 neu gegründete Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE in Boston 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. Weitere Informationen zum Fraunhofer CSE finden Sie auf S. 10.

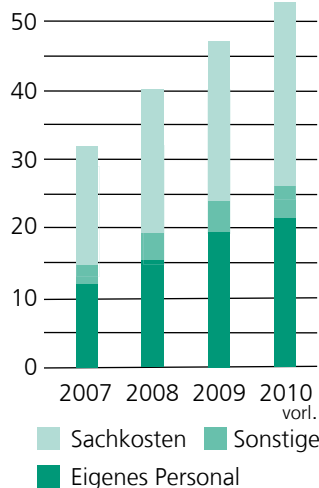
Die Finanzstruktur der Fraunhofer-Gesellschaft unterscheidet zwischen dem Betriebs- und dem Investitionshaushalt. Der Betriebshaushalt umfasst alle Personal- und Sachaufwendungen sowie deren Finanzierung durch externe Erträge und institutionelle Förderungen. Unser Betriebshaushalt beträgt 53,2 Millionen Euro. Zusätzlich zu den in der Grafik angegebenen Ausgaben tätigte das Fraunhofer ISE im Jahr 2010 Investitionen in Höhe von 8,4 Millionen Euro (ohne Bauinvestitionen und Konjunkturprogramme).

Personal

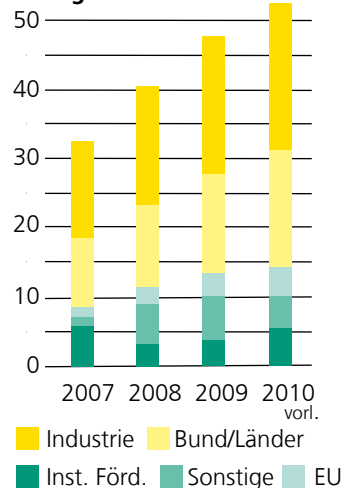


Am 31.12.2010 waren am Fraunhofer ISE insgesamt 1041 Mitarbeiter beschäftigt. Davon unterstützen 128 Doktoranden, 127 Diplomanden, 42 Praktikanten, 8 Auszubildende, 257 wissenschaftliche Hilfskräfte sowie weitere 104 Mitarbeiter (z. B. Gastwissenschaftler) die Arbeit in den Forschungsprojekten und tragen wesentlich zu den wissenschaftlichen Ergebnissen bei. Das Fraunhofer ISE leistet auf diese Weise einen wichtigen Beitrag zur Ausbildung von Forschern in diesem wichtigen Arbeitsgebiet.

Kosten Mio €



Erträge Mio €



FRAUNHOFER CSE

www.cse.fraunhofer.org



1 Das Fraunhofer CSE in Boston wurde 2008 gegründet und kooperiert eng mit dem Massachusetts Institute of Technology MIT.



2 Das Fraunhofer CSE führt auch Tests zur Qualitätssicherung von PV-Modulen durch.

Das Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE in Boston, Massachusetts, hat seinen Ursprung im Fraunhofer ISE und arbeitet mit uns eng zusammen. Finanzierungspartner des Fraunhofer CSE sind das Commonwealth of Massachusetts, National Grid, Fraunhofer ISE und die Fraunhofer-Gesellschaft. Das Fraunhofer CSE ist gegenwärtig in folgenden Feldern tätig:

Die Gruppe »Building Energy Efficiency« bearbeitet Fragen der Energieeffizienz im Gebäudebereich, speziell bei der Altbausanierung. Die Schwerpunkte liegen auf der komplexen Gebäudehülle sowie der energieeffizienten Haus- und Betriebstechnik – ein Gebiet, in dem in den USA ein großer Nachholbedarf besteht. Im Rahmen eines schon länger bestehenden Programms der US Regierung »Building America« wurde das Fraunhofer CSE ausgewählt, um ein Konsortium von Industriefirmen, Wohnungsentwicklern und Forschungseinrichtungen zu führen.

Der Bereich »Photovoltaische Module« wendet sich an US-Firmen, die neue Materialien testen und neue Modularchitekturen herstellen und untersuchen möchten. Für die Untersuchungen zur Lebensdauer von PV-Modulen stehen zwei Standorte im Raum Boston, Massachusetts, und Albuquerque, New Mexico, zur Verfügung.

Im Aufbau begriffen ist der Bereich intelligente Stromverteilung – Smart Grid.

Eine nicht technisch-wissenschaftlich ausgerichtete Aktivität ist das »Tech-Bridge« Programm. Ziel dieses Programms ist es, die Kommerzialisierung von innovativen Ideen aus dem Bereich der »Clean Energy« zu unterstützen, indem jungen Firmen Zugang zu den Forschungs- und Entwicklungsmöglichkeiten von Fraunhofer ermöglicht wird. Gleichzeitig unterstützt »TechBridge« Fraunhofer Ventures bei der Kommerzialisierung von Fraunhofer Know-how in den USA. Dieser Ansatz wird vom US Department of Energy mit einer Zuwendung von 1 Mio. US\$ unterstützt.

FuE-HÖHEPUNKTE

ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE UND GEBÄUDETECHNIK

- Prototypen einer BIPV entwickelt (Multifunctional BIPV Glazing)
- Neuartige Sorptionsmaterialien auf Basis metall-organischer Gerüstmaterialien synthetisiert
- Neues Kontrastmodell für optischen Komfort an Büroarbeitsplätzen entwickelt
- Gebäude- und Energiekonzept im Auftrag der Firma Pfizer Manufacturing Deutschland GmbH; für die CO₂-neutrale Energieversorgung am Produktionsstandort Freiburg erhielt Pfizer den Umweltpreis Baden-Württemberg 2010

ANGEWANDTE OPTIK UND FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN

- Rollenaufbau für die Nanoimprintlithographie zur Texturierung von Si-Solarzellen in Betrieb genommen
- Neuartige Strukturen durch Interferenzlithographie erzeugt (3-D Photonische Kristalle und hierarchische Strukturen)

SOLARTHERMIE

- Vermessung erster Solarkollektoren (Prototyp) marktüblicher Größe mit bionischem FracTherm®-Rollbond-Absorber aus Aluminium
- Inbetriebnahme einer Demoanlage mit neu entwickelten Solarkollektoren mit statischem Reflektor zur Erzeugung von Prozesswärme für eine Wäscherei

SILICIUM-PHOTOVOLTAIK

- Erfolgreiche Kristallisation von Cz-Kristallen und umg-Si Material in Blöcken
- Gekoppelte wellenoptisch-elektrische Modellierung von Solarzellen mit photonischen Strukturen implementiert
- Siebgedruckte Rückseitenkontaktsolarzelle mit rückseitiger Ladungsträgersammlung und 20,0 % Wirkungsgrad im PV-TEC hergestellt
- Großflächige, passivierte Metallverbundsolarzellen (MWT-PERC) mit einem Wirkungsgrad von 18,9 % im PV-TEC hergestellt
- Schnelles Verfahren zur Effizienzpotenzialabschätzung von

mc-Si Wafern mittels Mustererkennung von Photolumineszenzbildern entwickelt

- n-Typ Solarzelle mit industriell umsetzbarer Rückseitenpassivierung (PassDop) mit 22,4 % Wirkungsgrad
- 19,6 % Wirkungsgrad für eine großflächige (140 cm²) n-Typ Solarzelle mit gedruckten Vorderseitenkontakten und Al₂O₃-passiviertem Bor-Emitter
- Randversiegelter Modulaufbau (TPedge) im 20-Zellen-Format demonstriert; erste Zuverlässigkeitsprüfungen erfolgreich bestanden

ALTERNATIVE PHOTOVOLTAIK- TECHNOLOGIEN

- Mit 64 Prozent weltweit höchster Füllfaktor für flexible Module aus organischen Solarzellen
- Wirkungsgradweltrekorde für GaAs-Solarzellen erzielt: 26,4 % für 1000 W/m², 25 °C, AM1.5g und 29,1 % für 117 000 W/m², 25 °C, AM1.5d
- Erfolgreiche Herstellung monolithischer Tripelsolarzellen aus GaInP/GaInAs-Si mittels Wafer-Bondingtechnologie

REGENERATIVE STROMVERSORUNG

- Aktive Bypassdiode für Solarmodule mit 50 mV Vorwärtsspannung
- Erstes CPV Off-Grid-System zur Wasserförderung und Aufbereitung in Ägypten in Betrieb genommen
- Dezentrale Batteriespeicher mit hoher Lebensdauer entwickelt; Überführung in Pilotserie begonnen

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

- Inbetriebnahme der 50-Kanal-Impedanzspektroskopie-Anlage für Zell- und Stackcharakterisierung
- Inbetriebnahme eines 50 kW-Biomasse-Vergasers

SERVICEBEREICHE

- Inbetriebnahme eines 6-Licht Quellen Sonnensimulators
- Routinemäßige Vermessung von Konzentratormodulen unter kontrollierten Laborbedingungen
- Hochpräzise Bestimmung der Temperaturabhängigkeit der Solarzellenparameter im CalLab PV Cells eingeführt

EHRUNGEN UND PREISE



Dr. Frank Dimroth und seine Arbeitsgruppe »III-V Solarzellen und Epitaxie« wurden für den Rekordwirkungsgrad von 41,1 % für hocheffiziente Mehrfachsolarzellen mit dem 2. FEE-Innovationspreis Energie ausgezeichnet. Die Auszeichnung wird von der Fördergesellschaft Erneuerbare Energien e. V. vergeben. Die Preisverleihung fand am 2.3.2010 in Berlin statt.

Prof. Dr. Eicke R. Weber wurde im April 2010 zum Mitglied der »acatech«, der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften, gewählt.

Dr. Andreas Bett und **Dr. Frank Dimroth** wurden für ihre Forschungsarbeiten an hocheffizienten Mehrfachsolarzellen und Konzentratormodulen mit dem Joseph-von-Fraunhofer Preis ausgezeichnet. Der Preis wurde am 19.5.2010 anlässlich der Fraunhofer-Jahrestagung in Leipzig überreicht (s. Abb. 4).

Die Diplomarbeit von **Nils Brinkmann (Alumnus)** über ein neuartiges Zellkonzept wurde mit dem 3. Hugo-Geiger-Preis 2010 ausgezeichnet. Die Preisverleihung fand ebenfalls am 19.5.2010 im Rahmen der Fraunhofer-Jahrestagung in Leipzig statt: Thema der Diplomarbeit: »Epitaxie durch Löcher – Prozessentwicklung und Charakterisierung«.

Dr. Frank Dimroth erhielt für seine Forschungsarbeit an »Mehrfachsolarzellen mit Rekordwirkungsgraden« den höchst dotierten Wissenschaftspreis Frankreichs. Die Fondation Louis D. übergab die Auszeichnung am 9.6.2010 im Institut de France in Paris (s. Abb. 1).

René Kellenbenz wurde am 6.9.2010 für seinen Konferenzbeitrag bei der 35th IEEE PVSC in Honolulu mit dem »Student Winner« ausgezeichnet.

Dr. Christof Wittwer und seine Arbeitsgruppe »Intelligente Energiesysteme« wurden mit dem »M2M (Machine-to-Machine Kommunikation) Best Practice Award« ausgezeichnet. Sie erhielten den Preis für die Entwicklung des mobilen Smart Meters (mSM) im Rahmen des BMU-Flottenversuchs Elektromobilität mit VW und E.ON. Die Preisverleihung fand am 16.9.2010 auf dem M2M-Summit in Köln statt.

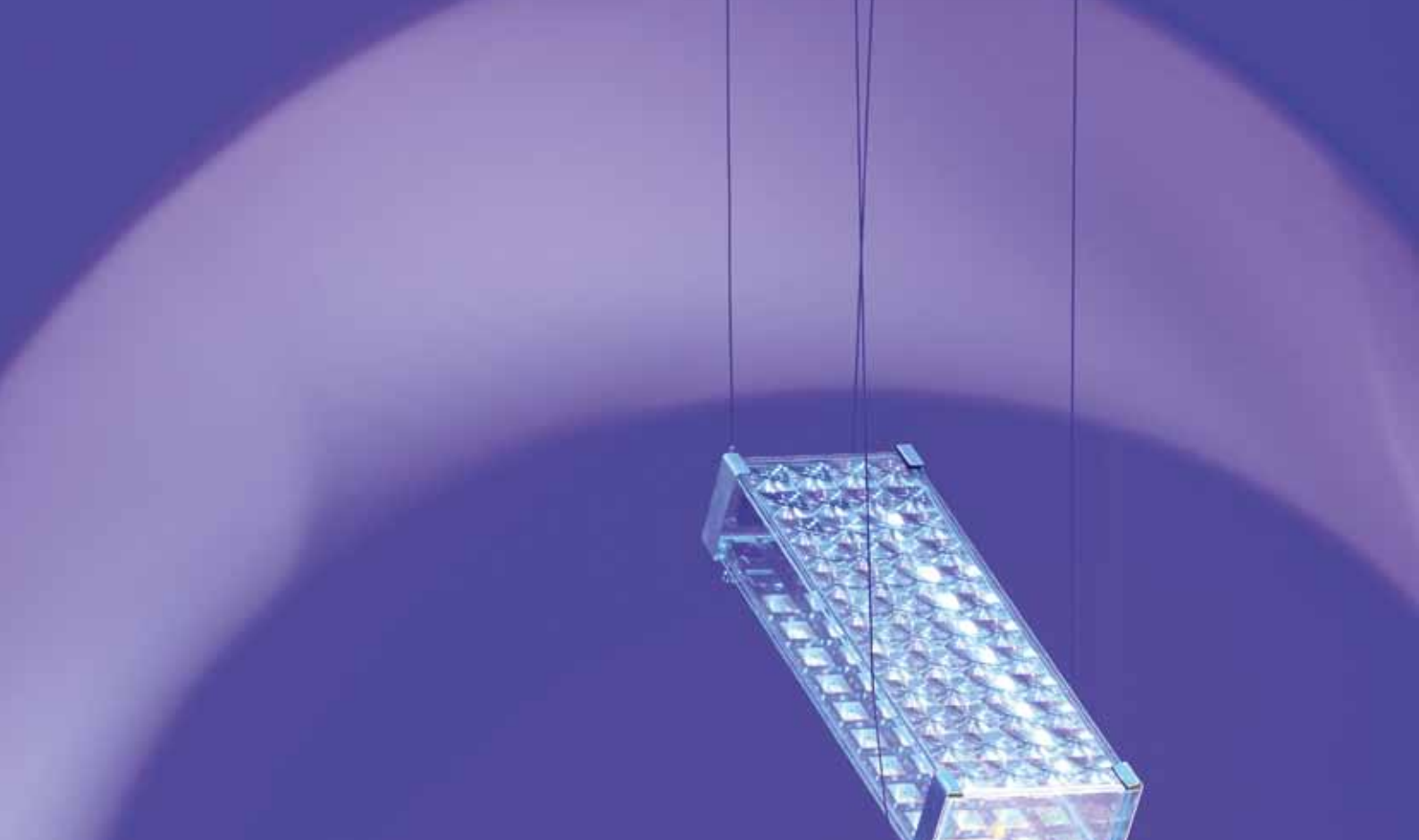
Dr. Werner Platzer und sein Team wurden in Berlin mit dem höchst dotierten Preis für internationale Energieforschung ausgezeichnet. Am 25.9.2010 verlieh Staatssekretär Dr. Georg Schütte (BMBF) die Preise im Berliner »ewerk« am Potsdamer Platz (s. Abb. 3).

Dr. Christopher Hebling erhielt am 27.9.2010 in Stuttgart den f-cell Sonderpreis als bester Referent.

Dr. Andreas Bett wurde am 27.10.2010 in Brüssel mit dem EARTO-Innovationspreis ausgezeichnet. Dieser wird für Forschungsarbeiten verliehen, die zur wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Entwicklung beitragen, in diesem Jahr für die Entwicklung von hocheffizienten Mehrfachsolarzellen und Konzentratormodulen (s. Abb. 2).

Dr. Doreen Kalz wurde am 7.11.2010 in Karlsruhe mit dem KIT-Doktorandenpreis des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT) im Kompetenzbereich »Erde und Umwelt« für ihre Dissertation ausgezeichnet. Titel der Dissertation: »Heating and Cooling Concepts Employing Environmental Energy and Thermo-Active Building Systems for Low-Energy Buildings«.

Dr. Hans-Martin Henning erhielt einen Ruf auf eine W3-Professur »Klima-Engineering«, Fakultät für Architektur, an der Hochschule für Technik, Stuttgart, den er ablehnte.



KURATORIUM

Das Kuratorium begutachtet die Forschungsprojekte und berät die Institutsleitung und den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft bezüglich des Arbeitsprogramms des Fraunhofer ISE (Stand: 4.11.2010).

VORSITZENDER

Dr. Hubert Aulich

PV Crystalox Solar GmbH, Erfurt

STELLVERTRETENDER VORSITZENDER

Dipl.-Ing. Helmut Jäger

Solvis GmbH & Co. KG, Braunschweig

MITGLIEDER

Ministerialrätin Susanne Ahmed

Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst
Baden-Württemberg, Stuttgart

Dr. Nikolaus Benz

Schott Solar CSP GmbH, Mitterteich

Dr. Klaus Bonhoff

Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellen-
technologie GmbH, Berlin

Regierungsdirektorin Kerstin Deller

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktor-
sicherheit (BMU), Berlin

Hans-Josef Fell

Mitglied des Deutschen Bundestags, Berlin

Ministerialrat Dr. Frank Güntert

Wirtschaftsministerium Baden-Württemberg, Stuttgart

Dr. Winfried Hoffmann

Applied Materials GmbH & Co. KG, Alzenau

Dipl.-Ing. Wilfried Jäger

VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Offenbach

Ministerialrat Dr. Knut Kübler

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi),
Berlin

Dr. Ralf Lüdemann

SolarWorld Innovations GmbH, Freiberg

Klaus-Peter Pischke

Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt

Dr. Klaus-Dieter Rasch

AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn

Dr. Dietmar Roth

Roth & Rau AG, Hohenstein-Ernstthal

Ministerialrat Klaus Sachs

Ministerium für Innovation, Wissenschaft, Forschung
und Technologie des Landes NRW, Düsseldorf

Dipl.-Ing. Rainer Schild

Alpha-InnoTec GmbH, Kasendorf

Prof. Dr. Frithjof Staib

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

Prof. Andreas Wagner

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Dr. Peter Wawer

Q-Cells SE, OT Thalheim, Bitterfeld-Wolfen

Regierungsdirektor Karl Wollin

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF),
Bonn

GESCHÄFTSFELDER

1 6 ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE
UND GEBÄUDETECHNIK

3 2 ANGEWANDTE OPTIK UND
FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN

4 2 SOLARTHERMIE

5 2 SILICIUM-PHOTOVOLTAIK

7 6 ALTERNATIVE PHOTOVOLTAIK-
TECHNOLOGIEN

8 6 REGENERATIVE
STROMVERSORGUNG

1 0 2 WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

1 1 4 SERVICEBEREICHE

EFFIZIENTES BAUEN MIT DER SONNE



ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE UND GEBÄUDETECHNIK

Gebäude sind heute Energieverbraucher. Die Schaffung eines angenehmen Raumklimas, die Beleuchtung und die Gebäudenutzung bedingen einen – je nach Gebäudestandard unterschiedlich hohen – Verbrauch an Strom und sonstigen, meistens fossilen Energieträgern. In der Zukunft können Gebäude zu Netto-Energieerzeugern werden, indem lokal regenerative Energien genutzt und auftretende Überschüsse ins Netz eingespeist werden. Bei Gebäuden mit einem sehr hohen Energiestandard und entsprechend niedrigem Verbrauch kann im jahreszeitlichen Mittel eine positive Bilanz erzielt werden. Derartige Gebäude sind bereits heute in Betrieb, allerdings handelt es sich bislang noch um wenige Pilotobjekte. Das Europäische Parlament hat aber einen Gesetzesvorschlag formuliert, der vorsieht, dass ab 2019 neue öffentliche Gebäude und ab 2021 sämtliche Neubauten einen Nullenergie-Standard erfüllen – also über das Jahr eine neutrale oder positive Energiebilanz aufweisen müssen. In der aktuellen Diskussion entwickelt sich der Nullenergieansatz als neuer Leitgedanke zur Bewertung von Gebäuden. Ganz unabhängig davon, wie dieser Standard im Einzelnen erreicht wird, kommt der Nutzung von Solarenergie eine zentrale Rolle zu. Solarwärmanlagen helfen, den verbleibenden Energiebedarf für Brauchwasser und Heizung – und gegebenenfalls auch Kühlung – deutlich zu reduzieren, und Photovoltaikanlagen können nicht nur zur Deckung des Strombedarfs beitragen, sondern im Fall von Überschüssen Strom ins Netz einspeisen. Die große Herausforderung für die Zukunft liegt einerseits darin, eine viel stärkere Integration der Solaranlagen in das Gebäude und die Gebäudehülle zu ermöglichen, ohne bauliche Anforderungen und die Lebensdauer der Bausysteme zu beeinträchtigen. Andererseits müssen entsprechende Konzepte auch für den Gebäudebestand entwickelt und in die breite Anwendung geführt werden. Nicht zuletzt gilt es, Konzepte im Bereich der Betriebsführung und Regelung – z. B. durch Lastmanagement oder den Einsatz von Speichern – zu entwickeln, die eine möglichst geringe Belastung der Stromnetze bedingen.

Am Fraunhofer ISE sind Gebäude und ihre technische Ausrüstung ein zentrales Geschäftsfeld. Unsere umfassenden Kenntnisse im Bereich der Technologien zur Solarenergienutzung einerseits und unsere langjährigen FuE-Aktivitäten im Bereich energieeffizienter Gebäude andererseits ermöglichen uns, in optimaler Weise Lösungen für die oben skizzierten Nullenergiegebäude zu entwickeln. Wir unterstützen Hersteller bei der Entwicklung neuer Komponenten und Geräte ebenso wie Planer und Architekten bei der Konzipierung anspruchsvoller Bauwerke. Die Bearbeitungstiefe der Themen reicht von der Grundlagenentwicklung, z. B. bei Materialien oder Beschichtungstechniken, bis zur Markteinführung von Komponenten und Systemen. Bei der Umsetzung in Bauprojekten bieten wir Planung, Beratung und Konzeptentwicklung zu allen Fragen im Bereich Energie und Nutzerkomfort an. Dabei verwenden wir modernste Simulationsverfahren, die wir bei Bedarf weiter entwickeln. Eine wichtige Rolle spielt die Qualitätssicherung im praktischen Einsatz, die wir durch die Begleitung von Demonstrationsgebäuden und -programmen sowie die Durchführung umfangreicher Feldtests und Monitoringkampagnen unterstützen.

Klassische Themen unserer Arbeiten im Bereich der Gebäudehülle sind Tageslichtnutzung und Sonnenschutz. Hinzu kommt zunehmend die Integration von aktiven Komponenten in die Gebäudehülle, Solarenergietechniken eingeschlossen. Die Wärmespeicherfähigkeit der Bausysteme spielt eine wichtige Rolle, um energiesparende Kühlkonzepte zu verwirklichen. Verfahren und Systeme auf der Basis von Phasenwechselmaterialien für Leichtbauten spielen hier nach wie vor ebenso eine Rolle wie Systeme zur thermischen Bauteilaktivierung.

Bei der Energieversorgung sind Wärmepumpen ebenso von wachsender Bedeutung wie Systeme der Kraft-Wärme-Kopplung und im weiteren auch der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung. Im Bereich des Einsatzes von Solarenergie stellen neben der



solaren Brauchwassererwärmung und der Heizungsunterstützung mit Solarenergie die Integration von Photovoltaik in die Gebäudehülle sowie die sommerliche Klimatisierung mit Solarenergie aussichtsreiche Anwendungen für die Zukunft dar.

Entscheidend für das Funktionieren der Gesamtsysteme – Gebäudehülle, Versorgungstechnik und Nutzer – ist die Betriebsführung. Mit Hilfe neuer modellbasierter Konzepte zur Betriebsführung wird die Leistungsfähigkeit einzelner Komponenten des Gebäudes permanent überwacht, evaluiert und gegebenenfalls korrigiert. Derartige Maßnahmen mit vergleichsweise geringem Investitionsaufwand ermöglichen signifikante Effekte zur Einsparung von Energie und Kosten. Sowohl die Entwicklung als auch die Implementierung derartiger Verfahren zur energieeffizienten Betriebsführung und Regelung sind deshalb ein wichtiges Arbeitsgebiet.

Im Team mit Architekten, Fachplanern und der Industrie entwickeln wir Gebäude für morgen. Wir verfolgen einen integralen Planungsansatz, um hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Energieeffizienz und Nutzerkomfort optimierte Konzepte zu verwirklichen. Dabei spielen gerade in städtischen Räumen Energiekonzepte, die über das Einzelgebäude hinausgehend Quartiere betrachten, eine wachsende Rolle, vor allem auch, wenn es um Netz gebundene Lösungsansätze geht. Dementsprechend haben wir den Fokus unserer Aktivitäten ausgedehnt. Die internationalen Rahmenbedingungen für alle diese Ansätze entwickeln wir u. a. durch unsere Mitarbeit in Projekten der Internationalen Energieagentur IEA.

Eine zentrale Bedeutung kommt der Langzeitbeständigkeit neuer Materialien und Komponenten zu. Wir konnten unsere Kompetenzen zu diesem Thema in den vergangenen Jahren kontinuierlich ausbauen und bieten Dienstleistungen an, die neben der messtechnischen Charakterisierung – indoor und/oder outdoor – auch die modellbasierte Prognose von Alterungsprozessen umfassen.

Im Rahmen des Programms »EnEff:Stadt« entwickelt das Fraunhofer ISE das Energie- und Sanierungskonzept des Stadtquartiers Freiburg Weingarten-West sowie unterschiedlicher Modellgebäude. Für die exemplarische Sanierung des Wohnhochhauses Buggingerstraße 50 haben wir die Maßnahmen zur Tageslichtnutzung, Bauphysik und Energieversorgung sowie zum thermischen Komfort erarbeitet. Der Heizwärmebedarf reduziert sich durch die optimierte Gebäudehülle und Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung künftig um ca. 80 Prozent. Das Dach des Gebäudes wird für eine PV-Anlage mit 25 kWp Leistung genutzt.

ANSPRECHPARTNER

Fassaden und Fenster	Dipl.-Phys. Tilmann Kuhn	Telefon +49 761 4588-5297 tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de
Gebäudekonzepte, Analyse und Betrieb	Dipl.-Ing. Sebastian Herkel	Telefon +49 761 4588-5117 sebastian.herkel@ise.fraunhofer.de
Wärme- und Kältespeicher	Dr. Peter Schossig	Telefon +49 761 4588-5130 peter.schossig@ise.fraunhofer.de
Energieeffiziente und solare Kühlung	Dr. Jens Pfafferott	Telefon +49 761 4588-5129 jens.pfafferott@ise.fraunhofer.de
Energie-Versorgungsanlagen für Gebäude	Dipl.-Ing. Sebastian Herkel	Telefon +49 761 4588-5117 sebastian.herkel@ise.fraunhofer.de
Lichttechnik	Dr. Jan Wienold	Telefon +49 761 4588-5133 jan.wienold@ise.fraunhofer.de



www.cost-effective-renewables.eu
www.e2b-ei.eu

KOMPONENTEN UND KONZEPTE ZUR SOLARENERGIENUTZUNG AN DER FASSADE

40 % der CO₂-Emissionen in der EU werden im Gebäudesektor verursacht. Die EU hat darauf reagiert und sich ehrgeizige Ziele gesetzt: Ab 2020 sollen Neubauten eine ausgeglichene Primärenergiebilanz aufweisen und der Primärenergiebedarf von Bestandsgebäuden soll drastisch reduziert werden. Um diese Ziele zu erreichen, muss die Energieeffizienz verbessert und die Solarenergienutzung in der gesamten Gebäudehülle deutlich verstärkt werden. Ziel des EU-Projekts »Cost-Effective« ist es, Komponenten und Konzepte zu entwickeln, die Fassaden als Energiegewinnflächen einsetzen.

Francesco Frontini, Sebastian Herkel, Michael Hermann, Korbinian Kramer, **Tilmann Kuhn**, Paolo Di Lauro, Christoph Maurer, Jörn Ruschenburg, Helen Rose Wilson, Hans-Martin Henning

Die EU hat gemeinsam mit der Bauindustrie eine große und wichtige Forschungsinitiative gestartet, mit deren Hilfe die CO₂-Emissionen im Gebäudesektor signifikant gesenkt werden sollen. Den Rahmen für diese Initiative bildet zum einen das 7. Forschungsrahmenprogramm der EU und zum anderen die Energy Efficient Buildings European Initiative (E2B) unter dem Dach der European Construction Technology Platform (ECTP). Die Bauindustrie wurde im Rahmen der geförderten Projekte an der Definition der Forschungsthemen für die EU-Ausschreibungen beteiligt. Die Industrie trägt die Hälfte des Forschungsbudgets von 500 Mio. €.

Eines der vier Startprojekte, die aus dieser Aktivität hervorgegangen sind, ist das vom Fraunhofer ISE koordinierte Projekt »Cost-Effective«, mit einem Volumen von 10,7 Mio. € und einer Laufzeit von vier Jahren. Ausgangspunkt des Projekts ist die Erkenntnis, dass insbesondere bei höheren Gebäuden mit relativ kleiner Dachfläche auch die Fassaden zur Energiegewinnung herangezogen werden müssen, um die Primärener-

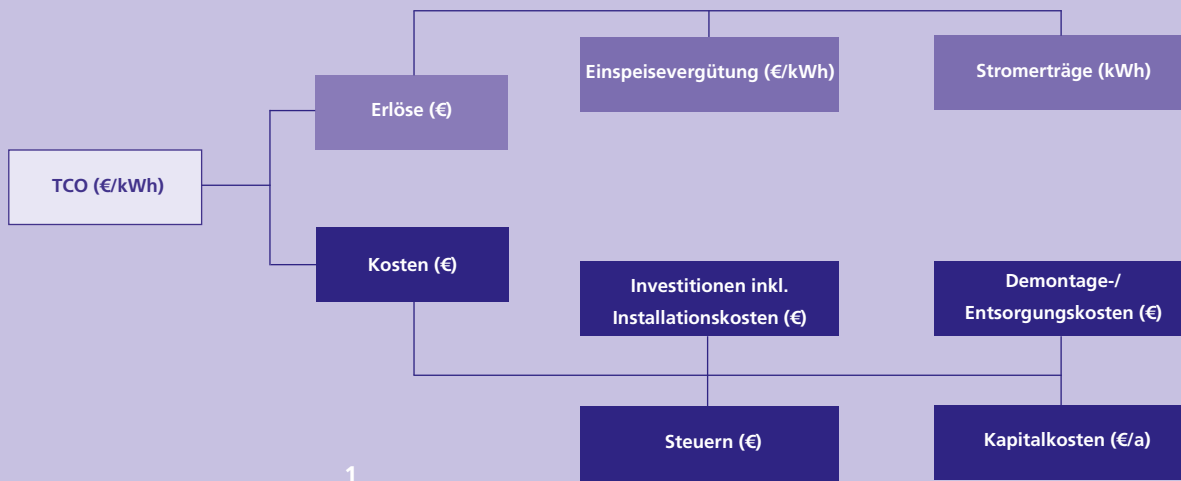
1 *In Fassade integrierter Vakuumröhrenluftkollektor.*

giebilanz des Gebäudes ausreichend verbessern zu können. Der Schwerpunkt liegt auf der Sanierung von Hochhäusern im Bestand, die nicht zu Wohnzwecken genutzt werden.

In einem ersten Schritt wurden Gebäudekategorien für Hochhäuser definiert. Für die fünf Kategorien mit dem höchsten CO₂-Ausstoß werden nun im Rahmen des Projekts technische und wirtschaftliche Konzepte sowie neue Komponenten zur Sanierung entwickelt. Bis zum Frühjahr 2011 werden fünf neue multifunktionale Fassadenkomponenten entwickelt, einige Prototypen sind bereits fertig gestellt:

- teiltransparenter, solarthermischer Fassadenkollektor, der in die Verglasung integriert ist und gleichzeitig Sonnenschutz und Blendschutz bietet
- solarthermischer Luft-Kollektor auf der Basis von luftdurchströmten, evakuierten Glasröhren mit problemlosem Stagnationsverhalten und hohen Arbeitstemperaturen
- teiltransparente PV-Verglasung mit winkelselektiver Transmission zur gleichzeitigen Optimierung von Solarerträgen, Sonnenschutz, Blendschutz und Aussicht
- neues Lüftungssystem mit zentraler Wärmerückgewinnung aus der Abluft und dezentraler, in die Fassade integrierter Zuluftvorwärmung
- unverglaster, putzintegrierter Solarkollektor in Kombination mit einer speziell entwickelten Wärmepumpe

Die Definition von technischen Konzepten für die fünf Gebäudekategorien ist abgeschlossen, die Ergebnisberichte sind über die Projekt-Webseite verfügbar. Das 4jährige Projekt läuft bis Ende September 2012 und wird durch die EU-Kommission gefördert.



1

GEBÄUDEINTEGRIERTE PV IM SPITZENCLUSTER SOLARVALLEY MITTELDEUTSCHLAND

Im Rahmen des vom BMBF geförderten Spitzenclusters »Solarvalley Mitteldeutschland« koordiniert das Fraunhofer ISE das Verbundvorhaben »PV – Gebäude- und elektrische Systemintegration (BIPV)«. Hauptziel des Verbundvorhabens ist es, die Lebenszykluskosten für gesamte BIPV-Anlagen pro kWh eingespeiste Energie zu senken. Die gebäude- und elektrotechnischen Kompetenzen des Fraunhofer ISE fließen hierbei gebündelt in die Entwicklung einer Bewertungsmethodik ein.

Daniela Dirnberger, Tilmann Kuhn, Wendelin Sprenger, Annette Trippe, **Helen Rose Wilson**, Hans-Martin Henning

In der Vergangenheit haben PV-Komponentenhersteller die Entwicklung ihrer Produkte oft unabhängig voneinander betrieben, ohne die Zusammenwirkung in einer BIPV-Anlage ausreichend zu beachten (BI – »Building-Integrated«). Allerdings kommt der ganzheitlichen Betrachtung des Gesamtsystems über den gesamten Lebenszyklus hinweg eine wichtige Bedeutung zu, denn durch eine entsprechende systemtechnische Optimierung, z. B. Module, Verkabelung, Schutztechnik, Netzanschluss, Wechselrichter, Montage-, Wartungs- und Serviceaufwand sowie Gebäudefunktionalität, kann eine wesentliche zusätzliche Kostenreduktion erreicht werden.

Im Verbundvorhaben »PV – Gebäude- und elektrische Systemintegration (BIPV)« arbeiten zwei Modulhersteller, ein Wechselrichterhersteller, ein Systemanbieter und zwei Forschungseinrichtungen mit uns zusammen, um die Lebenszykluskosten für gesamte BIPV-Anlagen pro kWh eingespeiste Energie zu senken. Zur Bewertung der Wirtschaftlichkeit wird in Zusammenarbeit mit dem Karlsruher Institut für Technologie (KIT) eine Methodik entwickelt, die auf dem TCO-Ansatz basiert (Total Cost of Ownership). Die Methodik untersucht die Aus- und Einzahlungen, die über die gesamte

1 Oberste Ebene der Baumstruktur, die der TCO-Analyse von PV- und BIPV-Anlagen zu Grunde liegt (TCO – Total Cost of Ownership).

Lebensdauer einer PV-Anlage für den Eigentümer der Anlage anfallen. Für die gebäudeintegrierte Photovoltaik werden auch eingesparte Investitions- und Betriebskosten berücksichtigt, die sich aus der Mehrfachfunktion der PV-Elemente, z. B. zur Verschattung oder wetterfesten Abdichtung der Gebäudehülle ergeben. Als Grundlage für die Methodik wurde die Struktur der TCO von PV-Anlagen aufgeschlüsselt und alle relevanten Einflussfaktoren und Bestandteile in einer Baumstruktur mit mehreren Ebenen dargestellt. Abb. 1 zeigt die oberste Ebene dieser Baumstruktur, welche die Zusammensetzung der TCO aus Erlösen und Kosten aufschlüsselt. Ausgehend von der weit verzweigten Baumstruktur wurde ein Berechnungswerkzeug programmiert, wobei der Schwerpunkt der ersten Fassung auf der Detaillierung der Kostenseite lag. Auf der nächsten Entwicklungsstufe der Methodik stehen die besonderen Anforderungen für die Ertragsberechnung von BIPV-Anlagen im Vordergrund. Bei fassadenintegrierten PV-Anlagen spielt die schräg einfallende Einstrahlung eine viel größere Rolle als bei geneigten, nach Süden ausgerichteten Freilandanlagen. Im TestLab Solar Façades wurde das bestehende Kalorimeter (für winkelabhängige g-Wert-Bestimmung) für winkelabhängige IU-Kennlinienmessungen an BIPV-Elementen weiter ausgerüstet. Diese Messungen ergänzen die elektrische Charakterisierung unter Standardprüfbedingungen im CalLab PV Modules. Zur Überprüfung und Validierung der Ertragsberechnungen werden insgesamt drei PV- und vier BIPV-Anlagen im Rahmen des vierjährigen Projekts vom Fraunhofer ISE überwacht und ausgewertet. Das Monitoring der ersten Anlage hat 2010 begonnen, um Basisdaten zum Vergleich mit den folgenden TCO-optimierten Anlagen zu liefern.

Das Projekt läuft bis 2013 und wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.



ENERGETISCHE SANIERUNG EINES WOHNHOCHHAUSES IN FREIBURG

Das 16geschossige Wohnhochhaus in der Buggingerstraße 50 in Freiburg ist das erste Gebäude, das im Rahmen der Stadtteilsanierung Weingarten-West beispielhaft energetisch modernisiert wird. Durch die Optimierung der Gebäudehülle und Wärmeversorgung wird für das 1968 errichtete Hochhaus künftig ein Standard erreicht, der dem Passivhausniveau entspricht.

Sebastian Herkel, **Florian Kagerer**, Hans-Martin Henning

Der westliche Teil des 1960–1968 entstandenen Freiburger Stadtteils Weingarten wird im Zeitraum 2007 bis ca. 2018 modernisiert. Das Areal umfasst eine Fläche von ca. 30 ha, in dem etwa 5800 Menschen wohnen. Die Wohnungen sind zum größten Teil im Besitz der kommunalen Wohnungsbau-gesellschaft der Stadt Freiburg, der Freiburger Stadtbau GmbH. Ziel des Vorhabens ist die Planung, Umsetzung und messtechnische Analyse der energetischen Sanierung der Gebäude und der Energieversorgung dieses Stadtteils. Der Primärenergieverbrauch aller Energiedienstleistungen soll um 50 % gegenüber dem heutigen Zustand reduziert werden und das Vorhaben ein zukunftsfähiges Modell energetischer Stadtsanierung darstellen. Der Pfad zu einer nachhaltigen, klimaneutralen Energieversorgung soll aufgezeigt werden.

Im Zug der Modernisierungsmaßnahmen wurde beschlossen, eines von vier baugleichen Wohnhochhäusern exemplarisch zu sanieren. Im unsanierten Zustand weist das Gebäude eine Wohnfläche von ca. 7300 m² auf. 90 Wohneinheiten aus 2- und 3-Zimmerwohnungen mit 60 und 80 m² Wohnfläche verteilen sich auf 16 Stockwerken. Aufgrund der kompakten Bauweise ist der Heizenergieverbrauch für ein Gebäude dieser Bauperiode mit etwa 70 kWh/(m²a) verhältnismäßig gering. Zielvorgabe für die Sanierung ist es, den Heizwärmebedarf um knapp 80 % auf 15 kWh/(m²a) zu reduzieren. Der Primärenergiebedarf für Heizung, Warmwasser, Hilfsenergie und

1 Erneuerte Fassade mit 200 mm Wärmedämmverbundsystem, Dreifachverglasung der Fenster und thermischer Trennung der neuen Balkonflächen.

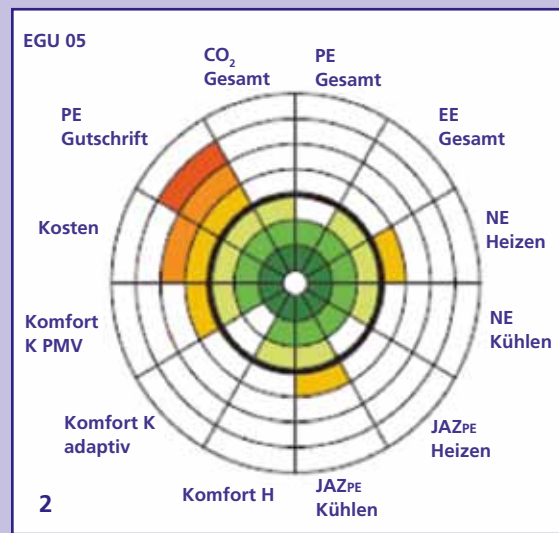
2 Einsatz von Aerogeldämmmatten mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,013 W/(mK) zur Reduktion von Wärmebrückeneffekten.

Haushaltsstrom soll nach der Sanierung 120 kWh/(m²a) nicht überschreiten. Hierzu wird die gesamte Gebäudehülle durch bekannte Maßnahmen wie die massive Wärmedämmung von Fassade, Dach und Kellerdecke sowie der Verwendung von Dreifachverglasung energetisch optimiert. Zur Reduktion der Lüftungswärmeverluste ist eine zentrale Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung vorgesehen. Die bestehende Bauweise mit Betonschotten und auskragenden Betondecken als Balkone verlangt eine detaillierte Betrachtung der Wärmebrücken. Als wesentliche Maßnahme werden die vorhandenen Balkone in die thermische Gebäudehülle integriert und durch neue, von der Fassade thermisch getrennte Balkone ergänzt. Der zusätzliche Gewinn an Wohnungsfläche ermöglicht es, die für heutige Bedürfnisse zu großen Wohnungsgrundrisse neu zu gestalten. Bei gleichbleibender Zimmerzahl verfügen die neuen Wohnungsgrundrisse zukünftig über eine Wohnfläche von ca. 50 bis 75 m². Die Gesamtwohnfläche erhöht sich damit auf ca. 8200 m² mit insgesamt 135 Wohneinheiten. In einer lichttechnischen und thermischen Simulation wurden die neuen Wohnungen auf Lichtverhältnisse sowie Raumkomfort untersucht und hieraus die Vorgaben für die Fassadenplanung (Fensterposition, Flächenanteil, Verglasungsqualität) abgeleitet. Die Zielwerte für den Heizwärme- und Primärenergiebedarf werden in der Planung erreicht. In einer detaillierten messtechnischen Untersuchung werden nach Fertigstellung der Sanierung der reale Gebäudebetrieb untersucht und die Verbrauchsdaten genau ermittelt.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Programm »EnEff:Stadt« gefördert.



© Pfizer Manufacturing Deutschland GmbH, Werk Freiburg



EXERGETISCHES MONITORING FÜR GEBÄUDE MIT ERDWÄRMENUTZUNG

Die Flächentemperierung hat sich als Heiz- und Kühlsystem für Niedrigenergie-Bürogebäude durchgesetzt. Eine energieeffiziente ganzjährige Versorgung für diese Systeme bieten erdgekoppelte Wärmepumpen im reversiblen Betrieb. Eine Querschnittsanalyse weist eine hohe Energieeffizienz dieser Versorgungssysteme nach und zeigt Potenziale für die thermo-hydraulische Auslegung und den Anlagenbetrieb auf.

Martin Fischer, Sebastian Herkel, Dirk Jacob, Doreen Kalz, **Jens Pfafferott**, Nicolas Réhault, Sebastian Zehnle, Hans-Martin Henning

Gemeinsam mit Industrie- und Forschungspartnern werden fünf Gebäude mit Erdwärmennutzung messtechnisch analysiert. Auf Basis einer gekoppelten Gebäude- und Anlagensimulation werden neue Regelalgorithmen bzw. Strategien für die Betriebsführung entwickelt. Die Erfahrungswerte gehen in ein Qualitätssicherungsverfahren ein. Der Schwerpunkt liegt auf der systemtechnischen Abstimmung zwischen Wärme-/Kältebereitstellung, -verteilung und -übergabe.

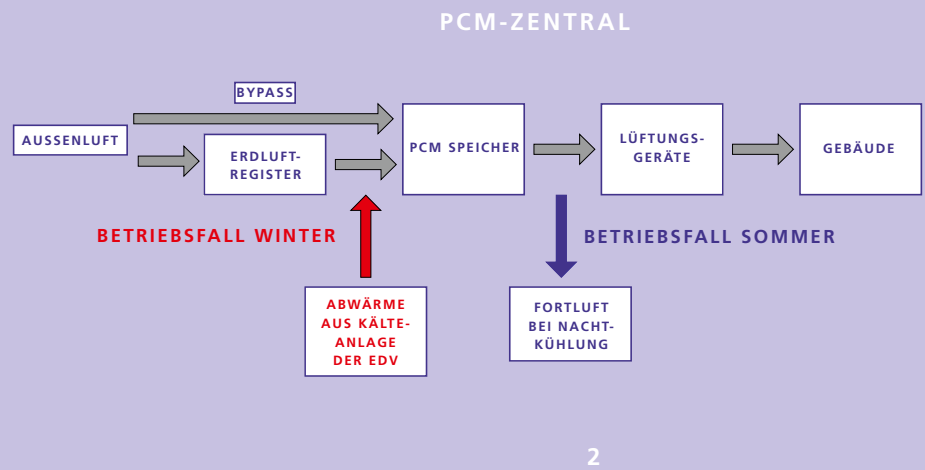
Heiz- und Kühlkonzepte mit Umweltenergie erreichen Jahresarbeitszahlen (JAZ) zwischen 3 und 3,8 $\text{kWh}_{\text{Wärme}}/\text{kWh}_{\text{Strom}}$ im Heizbetrieb (für Wärmepumpe plus Primärpumpe). Wird das Erdreich direkt zum Kühlen genutzt, liegen die JAZ im Kühlbetrieb zwischen 7 und 14 $\text{kWh}_{\text{Kälte}}/\text{kWh}_{\text{Strom}}$ (nur Primärpumpe für Erdsonde bzw. Grundwasserbrunnen). Eine reversible Wärmepumpe erreichte im kombinierten Betrieb von direkter und maschineller Kühlung eine JAZ von 5,8 $\text{kWh}_{\text{Kälte}}/\text{kWh}_{\text{Strom}}$ für Kältemaschine plus Primärpumpe. Der Hilfsstromeinsatz für die Pumpen im Primär- und Sekundärkreis liegt zwischen 3 und 10 $\text{kWh}_{\text{Strom}}/\text{m}^2_{\text{NGF}}\cdot\text{a}$ und zeigt, dass geringe Werte tatsächlich erreichbar sind. In allen Projekten sorgt eine Lüftungsanlage in Kombination mit der Flächentemperierung für ein angenehmes Raumklima und gute Luftqualität. Der

- 1 Heizen und Kühlen mit Umweltenergie arbeitet mit geringen Temperaturdifferenzen. Daher ist eine optimale thermo-hydraulische Auslegung und Betriebsführung des Gesamtsystems entscheidend.
- 2 Umfassende Bewertung eines Bürogebäudes nach Nutzenergie NE, Endenergie EE, Primärenergie PE, CO_2 -Emissionen, Kosten, Komfort und Energieeffizienz (JAZ getrennt für Heizen und Kühlen).

hohen Energieeffizienz steht entgegen, dass der gewerkeübergreifende Ansatz dieser Heiz- und Kühlkonzepte die Planung und den optimalen Betrieb erschwert. Daher spielt die Entwicklung von Werkzeugen und Bewertungsdiagrammen für die umfassende Planung eine zentrale Rolle. In sogenannten Spinnendiagrammen können z. B. die einzelnen Zahlen aus Planung oder Betrieb vergleichend dargestellt werden. Stärken und Schwächen eines Gebäude- und Energiekonzepts können in Planung bzw. Betrieb identifiziert und bewertet werden.

Das Spinnendiagramm (Abb. 2) ist so aufgebaut, dass alle Größen entsprechend eines Anforderungskatalogs analog zu den bekannten Energielabels in Kategorien A bis G umgesetzt werden. Grün steht für einen hohen und rot für einen geringen Grad der Zielerreichung. Das Diagramm wurde mit Messwerten aus 2005 für das Passivhaus ENERGON in Ulm erstellt. Das Bürogebäude wird mit Fernwärme und über eine Erdsondenanlage mit Wärme und Kälte versorgt. Links beginnend ist zu erkennen, dass ganzjährig ein hoher thermischer Komfort bereitgestellt wurde. Während die Energieeffizienz (JAZ) im Kühlbetrieb noch verbessert werden kann, ist diese im Heizbetrieb schon heute sehr hoch. Der Kühlenergiebedarf (NE Kühlen) ist sehr gering, während der Heizwärmebedarf (NE Heizen) noch reduziert werden kann. Insgesamt sind End- und Primärenergieeinsatz (EE bzw. PE) sehr gering, was sich in einer geringen CO_2 -Emission widerspiegelt.

Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.



LATENTWÄRMESPEICHER IN ZENTRALEN LÜFTUNGSSYSTEMEN

Latentwärmespeichermaterialien (Phase Change Materials/PCM) werden auf unterschiedliche Weise in Gebäuden eingesetzt, um überschüssige Wärme oder Kälte im Tagesverlauf zwischenzuspeichern. Hierdurch kann thermischer Nutzerkomfort bei reduziertem Energieaufwand für die Klimatisierung erreicht werden. Im Projekt »PCM-Zentral« untersuchen wir einen zentralen PCM-Speicher direkt im Luftstrom, der sowohl zur Vorerwärmung als auch Vorkühlung der Zuluft genutzt wird.

Thomas Haussmann, Hannah Neumann, Peter Schossig, Hans-Martin Henning

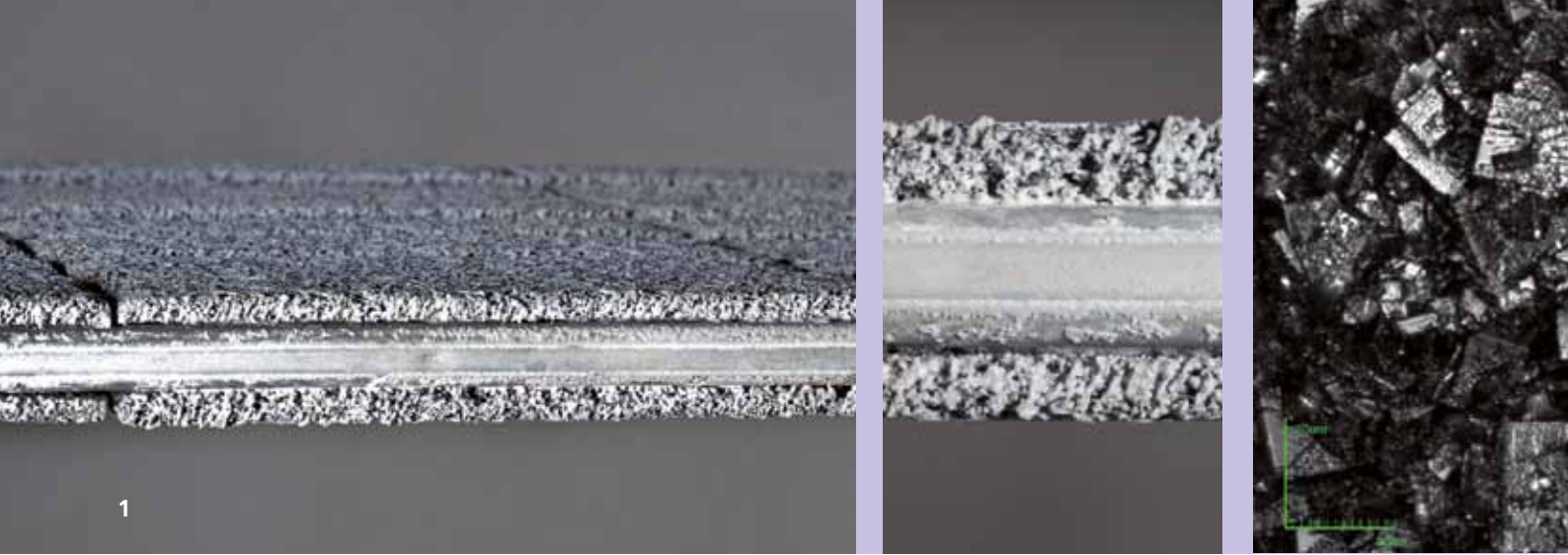
Für den Neubau des Amts- und Landgerichts Düsseldorf wurde von den Projektpartnern Emco Bau- und Klimatechnik GmbH & Co. KG, agn Niederberghaus + Partner und dem Bau- und Liegenschaftsbetrieb NRW ein zentraler Latentwärmespeicher (PCM) in Kombination mit einem Erdluftregister entwickelt, um den Frischluftbedarf des Gebäudes möglichst energieeffizient zu temperieren. Zentrales Ziel des gemeinsamen Forschungsprojekts ist die Realisierung, Bewertung und Optimierung des Speichers im realen Einsatz.

Die Wahl des Schmelzpunkts beschränkt normalerweise die Verwendung eines PCM im Gebäude entweder für die Heizungs- oder für die Kühlungsunterstützung. In diesem Konzept wird der PCM-Speicher jedoch als Vorstufe der Temperierung eingesetzt. Eine geschickte Wahl des Schmelzpunkts lässt hier erstmals den Einsatz des gleichen Speichers sowohl zur Heizungs- als auch zur Kühlungsunterstützung zu. Zusätzlich ist dem PCM-Speicher ein 620 m langes Erdluftregister vorgeschaltet, um den Energiebedarf der anschließenden konventionellen Klimatechnik zu reduzieren und durch Umweltwärme und Abwärmenutzung zu ersetzen. Im Winter wird dazu der PCM-Speicher außerhalb der Betriebszeiten des Gebäudes mit Abwärme aus der zentralen Kälteversorgung der EDV-Systeme

- 1 Geöffneter PCM-Speicher mit Blick auf die einzelnen PCM-Platten direkt im Luftkanal.
- 2 Der Energiebedarf zur Klimatisierung der Zuluftströme wird durch das vorgeschaltete Erdluftregister und den PCM-Speicher reduziert und anteilig durch Umweltkälte ersetzt.

beladen, wenn diese nicht anderweitig verwendet werden kann. Während der Gebäudenutzungszeiten wird die im Speicher zur Verfügung stehende Wärme zur Vorerwärmung der Zuluft genutzt. Im Sommer wird der Speicher nachts mit Außenluft durchspült, um ihn zu regenerieren, entweder mit vorgeschaltetem Erdluftregister oder über einen Bypass direkt mit Außenluft abhängig von der Außentemperatur. Tagsüber kann so die Zuluft ins Gebäude über den Speicher vorgekühlt werden. Als PCM wird ein Salzhydrat mit einer Schmelztemperatur von ca. 24 °C eingesetzt. Extrudiertes Graphit in Plattenform, das der Erhöhung der inneren Wärmeleitfähigkeit dient, wird mit dem Salzhydrat infiltriert und in einer mehrlagigen Aluminium-Kompositfolie luft- und wasserdicht eingeschweißt. Mehrere Tausend dieser Einzelplatten (Abb. 1) werden direkt im Zuluftkanal vor den Klimageräten platziert und verfügen mit ca. 11 t PCM in einem 15 K Temperaturintervall rund um den Schmelzpunkt über eine Wärmespeicherkapazität von ca. 500 kWh. Durchströmt wird der Speicher von bis zu 30 000 m³/h Frischluft. Arbeitsschwerpunkte des Projekts waren die Auswahl geeigneter PCM, der Verkapselung und die Definition der Plattengeometrie. Die einzelnen Speicherkomponenten wurden von der FH Münster und dem Fraunhofer ISE vermessen. Zentrale Aufgabe ist nun die Entwicklung von Regelungsstrategien, um den Speicher möglichst energieeffizient zu betreiben. Hierzu wird zurzeit ein Simulationsmodell erstellt und anhand von Messdaten aus dem laufenden Monitoring validiert.

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.



ADSORBERENTWICKLUNG FÜR ADSORPTIONS- WÄRMEPUMPEN UND KÄLTEMASCHINEN

Kompakte Adsorptionswärmeübertrager zu entwickeln und zu bauen, ist eines der wichtigsten Ziele unserer aktuellen Arbeiten im Bereich thermisch angetriebener Wärmepumpen und Kältemaschinen. Hierfür wurden bereits in der Massenproduktion eingesetzte Wärmeübertragerkonzepte erfolgreich mit einem neu entwickelten Adsorbens-Metall-Komposit kombiniert.

Gerrit Földner, Ferdinand Schmidt, Lena Schnabel,
Daniel Sonnekalb, Peter Schossig, **Ursula Wittstadt**,
Hans-Martin Henning

Weil die entstehende Wärme beim Adsorptionsvorgang die eigentliche Adsorption behindert, ist der Abtransport in das Wärmeträgermedium – und damit die Bauform des Wärmeübertragers – von größter Bedeutung für den Adsorberbetrieb. Um die Leistungsdichte des Adsorbers zu verbessern, ist zugleich eine möglichst große Menge Sorptionsmaterial pro Volumen wünschenswert. Unser Lösungsansatz sind poröse metallische Trägerstrukturen, die eine hohe spezifische Oberfläche und gute Wärmeleiteigenschaften aufweisen. Diese stellen die Basis des neu entwickelten Kompositmaterials aus versinterten Aluminium-Fasern und Zeolith dar. Im Vergleich zum reinen Sorptionsmaterial erreicht dieses eine deutlich erhöhte Wärmeleitfähigkeit (10 statt 0,2 W/(mK)) bei einer Porosität von ca. 30 % und einem Massenverhältnis von Adsorbens zu Metall von 1:1,4.

Zunächst wurde die Kinetik des Adsorptionsprozesses an Proben im Labormaßstab (30 x 30 mm²) untersucht. Dafür wurde das versinterte Fasermaterial auf ein Trägerblech, das die Wand des Wärmeübertragers simuliert, aufgelötet und anschließend von der Firma SorTech AG mit Sorptionsmaterial (SAPO 34) beschichtet. Diese Proben zeigten eine schnelle Massenaufnahme: 90 % der Endbeladung werden bereits nach 210 s erreicht. Im nächsten Schritt wurde ein Prototyp

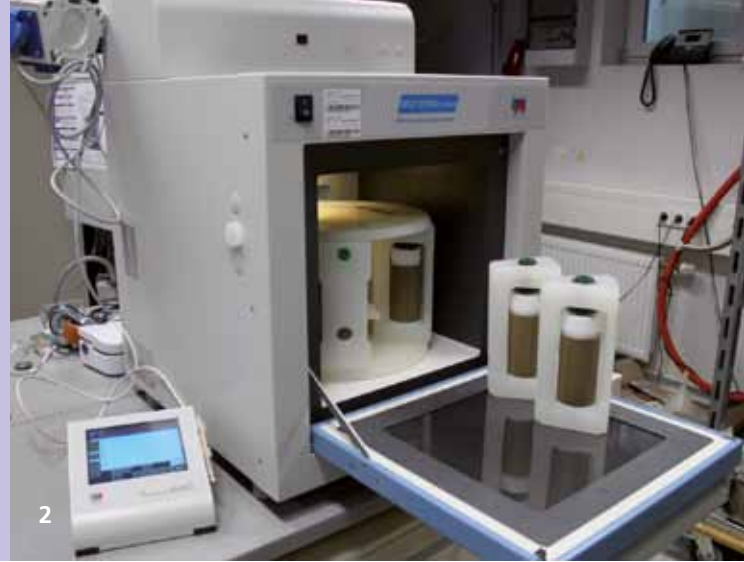
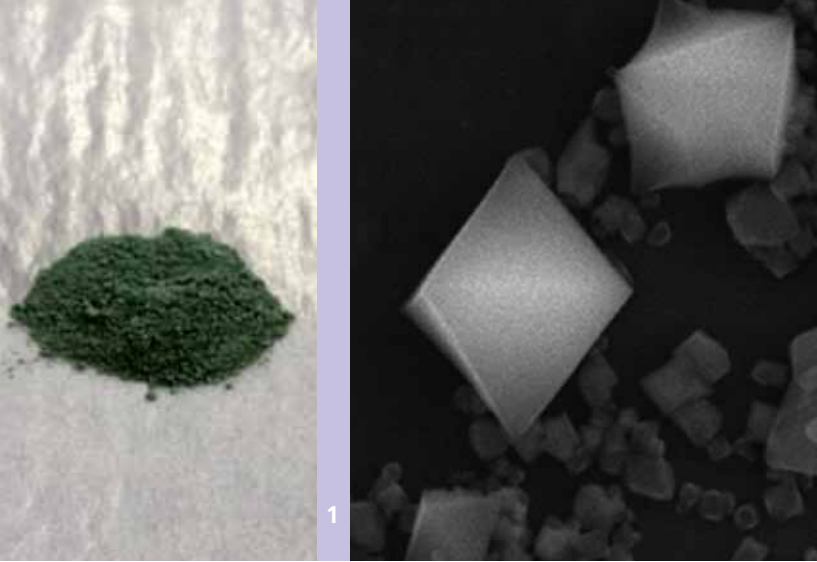
1 *Zwei Detailaufnahmen des am Fraunhofer ISE entwickelten Prototyps (links, Ausschnitt Mitte) sowie Lasermikroskopaufnahme des Zeoliths (rechts).*

eines Adsorbers hergestellt (Abb. 1). Die Wärmeübertragerstruktur basiert auf im Automobilbereich eingesetzten Aluminium-Flachrohren. Diese können mit Lot beschichtet werden, was eine Lötung aller Bauteile (Flachrohre, Fluidsammler/-verteiler und Fasermaterial) in einem Schritt erlaubt. Ein deutlicher Vorteil gegenüber den derzeit verwendeten Lamellenwärmeübertragern ist die flächige Kontaktierung des Kompositmaterials mit der Wärmeübertrageroberfläche, die für kurze Wege bei der Abfuhr von Wärme sorgt.

Der Prototyp wurde im Adsorberelementeteststand des Fraunhofer ISE vermessen. Hier kann an kompletten, fluiddurchströmten Adsorptionswärmeübertragern die Massenzunahme während der Adsorption bestimmt werden. Ebenso können wir komplette Adsorptions- und Desorptionszyklen experimentell nachstellen.

Erste Messungen am Prototypen lassen einen deutlichen Einfluss der Wärmeabfuhr über das Wärmeträgerfluid erkennen. Bei schlechter Wärmeabfuhr (niedrigen Volumenströmen) erfolgt die Massenaufnahme deutlich langsamer. Ab einer Verzehnfachung des Volumenstroms – und damit einer deutlich verbesserten Wärmeabfuhr – ist keine Beschleunigung mehr zu erkennen. Mit dem neu entwickelten Kompositmaterial ist damit nicht mehr die Sorptionsseite begrenzend.

Die Arbeiten erfolgten im Rahmen des Fraunhofer-Eigenforschungsprojekts »Thermisch angetriebene Hochleistungskälteverfahren THOKA« (Fraunhofer IFAM, ISE, ITWM und IVV).



NEUE SORPTIONSMATERIALIEN: SYNTHESE UND ERWEITERTE CHARAKTERISIERUNG

Auf der Suche nach neuen Sorptionsmaterialien für energietechnische Anwendungen sind in den letzten Jahren mit den metallorganischen Gerüstverbindungen (Metal Organic Frameworks/MOF) neue Materialien entwickelt worden, die sich durch herausragende Eigenschaften auszeichnen. Im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojekts wurden neue Verbindungen aus dieser Materialklasse identifiziert und synthetisiert. Die gemessenen Wasseradsorptionskapazitäten übertreffen hierbei alle bislang untersuchten Materialien. Des Weiteren konnten wir die Charakterisierungsmöglichkeiten in Hinblick auf die Synthesen deutlich erweitern.

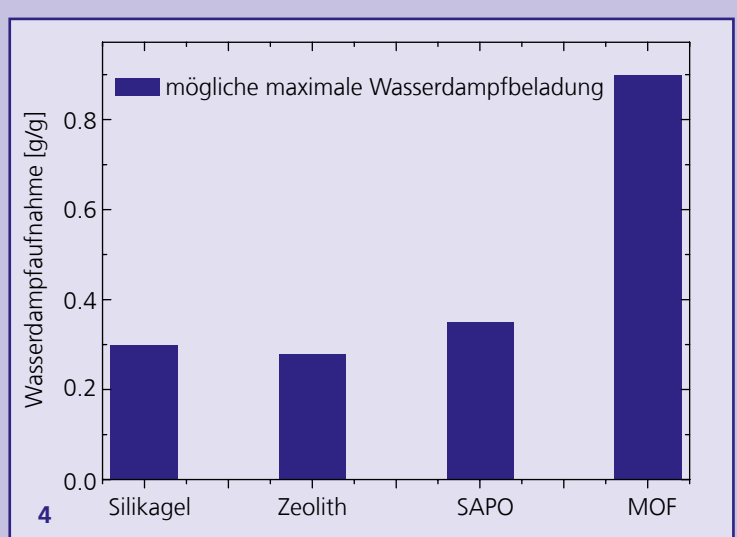
Stefan K. Henninger, Philipp Hügenell, Felix Jeremias, Harry Kummer, Gunther Munz, Peter Schossig, Hans-Martin Henning

Die energetische Nutzung des Adsorptionsprozesses in thermisch angetriebenen Wärmepumpen und Kältemaschinen oder Wärmespeichern befindet sich im Markteintritt. Unter Adsorption versteht man hierbei die reversible Anlagerung eines Arbeitsmittels aus der Gasphase an der inneren Oberfläche von mikroporösen Feststoffen. Bei dieser Anlagerung findet ein Phasenübergang von der Gas- in die adsorbierte Phase unter Freisetzung der Adsorptionsenthalpie statt. Diese Energie kann z. B. für die Gebäudeheizung genutzt werden.

Neben den bereits bekannten und vielfach untersuchten Materialklassen der Zeolithe und der porösen Kieselgele wurden in den letzten Jahren weitere Fortschritte hinsichtlich der Wasserdampfaufnahme in einem Adsorptionsprozess durch die Synthese von zeolithartigen Materialien wie Aluminophosphaten und Silica-Aluminophosphaten erzielt. Neben der Modifikation und Weiterentwicklung dieser Materialien wurden die Möglichkeiten durch die neue Klasse der metallorganischen Gerüstverbindungen enorm erweitert. MOF

zeichnen sich durch eine modulare Struktur aus. Charakteristisch ist der Aufbau aus Clustern anorganischer Metallionen, die durch organische Linkermoleküle miteinander verknüpft sind. Die zahllosen Kombinationsmöglichkeiten erlauben den Aufbau vielfältiger 3-dimensionaler Topologien und ein Maßschneidern der Materialien für die jeweilige Anwendung. Durch chemische Modifizierungen an den verknüpfenden Molekülen können zudem physikalische Eigenschaften der Materialien in weiten Grenzen eingestellt werden, wodurch den Anforderungen für den technischen Einsatz Rechnung getragen wird. Neben den vielfältigen Anwendungsgebieten, z. B. Gasspeicherung, Gastrennprozesse, Medizintechnik, Sensorik oder Katalyse, wurden MOF für die Anwendung als Sorptionsmaterial in thermischen Speichern, Adsorptionswärmepumpen oder -Kältemaschinen mit dem Arbeitsmittel Wasser als sehr vielversprechend identifiziert. Dies wird auch durch die enorm hohen Porenvolumina und Oberflächen der MOF bestätigt. So wurden z. B. spezifische Oberflächen von bis zu 5000 m²/g und spezifische Porenvolumina von bis zu 2 cm³/g erreicht – dies entspricht einer Steigerung um das 3- bis 4fache gegenüber den klassischen Materialien Zeolith und Silicagel.

Eine erste Evaluation der Materialien kann daher auf Basis der Porenvolumen und der inneren Oberfläche erfolgen. Zur Analyse der Porenstruktur steht uns ein vollautomatisches volumetrisches Sorptionsgerät zur Verfügung. Mit Hilfe von Stickstoffsorption bei 77 K können so die innere Oberfläche, die Porenradienverteilung sowie das maximale Porenvolumen der hergestellten Proben bestimmt werden. Diese physikalischen Kenngrößen sind erste wichtige Parameter zur Bestimmung der Qualität und der zu erwartenden Adsorptionskapazität der untersuchten Materialien. Zusätzlich ist dieses Gerät mit einer Option ausgerüstet, um Adsorptionsmessungen von anderen, nichtkorrosiven Gasen, z. B. Wasser oder Methanol/Ethanol, zu realisieren.



1 Am Fraunhofer ISE synthetisierter MOF.

2 Eingesetzter Mikrowellenreaktor: Die Syntheszeiten konnten durch den Einsatz einer Mikrowelle deutlich reduziert werden.

Neben der Wasserdampfaufnahme als wichtigste Kenngröße ist die hydrothermale Stabilität in Hinblick auf Wärmepumpen oder Kältemaschinen generell ein kritischer Punkt. Bedingt durch den organischen Linker ist die Stabilität dieser neuen Materialien in Wasserdampf Atmosphäre im Vergleich zu Zeolithen reduziert. Hier können wir auf experimentelle Anlagen aus einem weiteren Forschungsprojekt zurückgreifen. Neben einer speziell entwickelten Zyklientestanlage zur Alterung von Kompositen stehen verschiedene Thermowaagen zur Kurzzyklisierung und simultanen Charakterisierung zur Verfügung. Zur strukturellen Charakterisierung der Materialien verwenden wir Röntgenbeugungsexperimente, die präzise Informationen über den molekularen Aufbau der Probe liefern. Weiterhin werden die Proben unter einer definierten Atmosphäre (relative Feuchte und Temperatur) auf strukturelle Veränderungen während des Adsorptionsprozesses untersucht. So gewonnene Erkenntnisse können auf das Design der nächsten Materialgeneration übertragen werden.

Neben der grundsätzlichen Evaluation und Identifikation geeigneter Materialien steht auch die Optimierung von Syntheserouten im Fokus unserer Arbeiten am Fraunhofer ISE. Durch diesen Schritt wird die Diskrepanz zwischen den unterschiedlichen Rahmenbedingungen der grundlagenorientierten Synthese und den Anforderungen eines anwendungsnahen Einsatzes in Wärmepumpen überwunden. Durch die erfolgreiche Synthese erster Materialien konnte das hohe Potenzial metallorganischer Gerüstverbindungen hinsichtlich des Sorptionsvermögens und der chemischen Vielseitigkeit eindrucksvoll bewiesen werden. Neben der in der Literatur beschriebenen Synthese wurden auch verschiedene Modifikationen im Hinblick auf eine Synthese im vergrößerten Maßstab durchgeführt. Insbesondere der Austausch von aggressiven Säuren oder die Reduktion der Temperatur und damit des Drucks wurden untersucht. Des Weiteren wurde der Einfluss von Tensiden auf die Kristallmorphologie der entste-

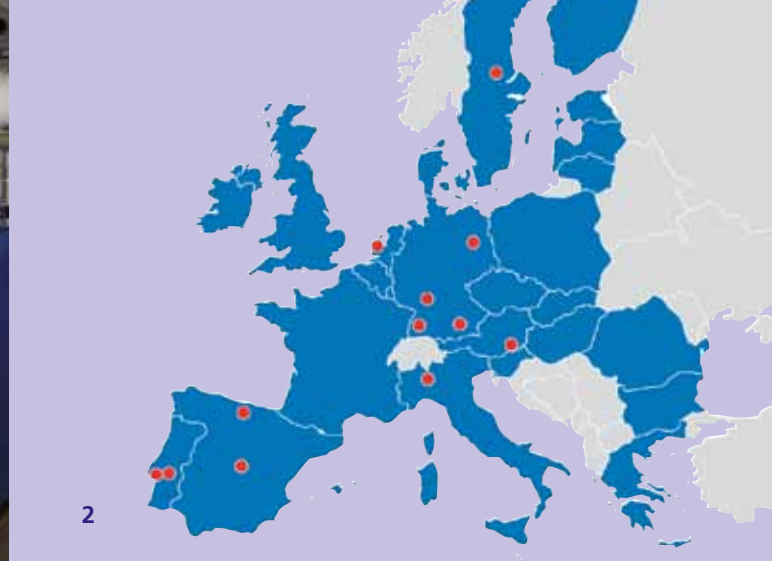
3 Oberflächenscan einer aufkristallisierten Probe.

4 Vergleich der maximalen Wasserdampfaufnahme verschiedener Materialien und des MOF.

henden Verbindung untersucht. Alternativ zur hydrothermalen Synthese wurde in Anlehnung an die Synthese eines metallorganischen Netzwerks mittels Ultraschall die mikrowelleninduzierte Synthese untersucht. Durch spezielle Phänomene wie lokale Überhitzung konnte die Reaktionszeit erfolgreich von Stunden auf Minuten verkürzt werden. Zusätzlich wird durch die verkürzte Reaktionszeit die Bildung von kleineren Kristallen (~2 µm) bevorzugt. Kleinere Kristalle korrespondieren hierbei häufig mit einer schnelleren Adsorptionskinetik, was für die Leistungsdichte in der Anwendung vorteilhaft ist. Die Aufarbeitung des Syntheseprodukts spielt ebenfalls eine wichtige Rolle. Neben dem Reinigen mit verschiedenen Lösungsmitteln und anschließender Filtration konnte die Aufreinigung durch den Einsatz einer Zentrifuge mit bis zu 10 000 Umdrehungen deutlich beschleunigt und verbessert werden.

Das Potenzial von MOF für Wärmetransformationsanwendungen auf Basis der gemessenen Porenvolumen und Oberflächen der hergestellten Materialien wurde eindrucksvoll durch Wassersorptionsmessungen in unseren thermogravimetrischen Apparaturen bestätigt. Die gemessenen Adsorptionskapazitäten der hergestellten Proben übertreffen hierbei deutlich alle bislang untersuchten Materialien. So zeigt die beste Probe eine Wasseraufnahme von bis zu 900 g/kg und kann damit nahezu das Eigengewicht an Wasser zusätzlich aufnehmen. Zusätzlich tritt die Adsorption schlagartig bei Überschreiten eines gewissen Dampfdrucks auf. Diese außergewöhnliche Charakteristik wird bislang nur dadurch geschmälert, dass dieser Wert erst bei sehr hohen relativen Dampfdrücken ($p/p_0 = 0.5$) erreicht wird. Erste Erfolge zur Verschiebung des Schalldrucks konnten aber bereits verzeichnet werden.

Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) sowie das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr des Landes Baden-Württemberg unterstützt.



KRAFT-WÄRME-KÄLTE-KOPPLUNG IM KLEINEN LEISTUNGSBEREICH

Die zukünftige Anwendung der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) liegt im Bereich von Gewerbeimmobilien, Krankenhäusern, kleineren Hotels und Bürogebäuden, in denen sowohl Kühl- als auch Heizbedarf besteht. Die vielseitige Technik der KWKK auch im Bereich kleiner und mittlerer Leistungen weiter zu entwickeln und markttaugliche Lösungsansätze voran zu treiben, war Aufgabe des EU-Projekts »PolySMART«. Im Fokus des 4jährigen Projekts standen der Aufbau, der Betrieb und die Evaluierung von zwölf realen Anlagen mit unterschiedlichen Spezifikationen und verschiedenen Einsatzgebieten.

Tomas Núñez, Matthias Schick Tanz, **Christine Weber**, Hans-Martin Henning

Anlagen zur Kraft-Wärme-Kopplung sind auf dem Vormarsch und Blockheizkraftwerke (BHKW) sind heute im Bereich kleiner Leistungen am Markt verfügbar. Sie versorgen Gebäude mit Wärme und erzeugen zugleich Strom, der lokal verbraucht oder in das öffentliche Versorgungsnetz eingespeist wird. Bisher ist diese Technik an die Heizperiode gebunden, da nur in dieser Zeit entsprechende Wärmeleistungen in Gebäuden benötigt werden. Eine mögliche Lösung für einen ganzjährigen und damit effizienteren Einsatz: In einer ergänzenden thermisch angetriebenen Kältemaschine wird die Abwärme des BHKW in Kälte umgewandelt und für die Klimatisierung von Gebäuden eingesetzt.

Im Projekt »PolySMART« haben sich unter Leitung des Fraunhofer ISE 32 Partner aus Forschung und Industrie mit der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung im kleinen und mittleren Leistungsbereich beschäftigt. Die Leistungs- und Betriebsdaten der Versuchsanlagen wurden mit einem eigens entwickelten Verfahren ausgewertet. Eine der Anlagen wurde am Fraunhofer ISE in Freiburg installiert und wird dort zur

1 Demonstrationsanlage zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung am Fraunhofer ISE. Zwei Adsorptionskältemaschinen mit einer Kälteleistung von jeweils 5,5 kW nutzen die Abwärme eines mit Erdgas betriebenen BHKW.

2 Übersicht der zwölf Demonstrationsanlagen zur Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung, die im Rahmen des Projekts »PolySMART« in Europa installiert und evaluiert wurden.

Klimatisierung mehrerer Büroräume mit hohem Kühlbedarf genutzt. Das Besondere dabei: Ein Teil der Büroräume wird mittels Umluftkühlgeräte am Tag klimatisiert. Für die anderen Räume wird die Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung in der Nacht betrieben, um eine mit Phasenwechselfpeicher ausgestattete Kühldecke zu entladen. Tagsüber kann diese Kühldecke somit Kühllasten aufnehmen, ohne zeitgleich aktiv gekühlt werden zu müssen. Durch diese Vorgehensweise ist eine Steigerung der Betriebsstundenzahl und der Effizienz der installierten Anlage möglich.

Im Ergebnis hat der Feldversuch gezeigt, dass die verwendeten Anlagenkomponenten, insbesondere die zumeist mit Erdgas betriebenen BHKW und die thermisch angetriebenen Kältemaschinen mit Kälteleistungen im Bereich 5 bis 25 kW, eine hohe technische Reife erreicht haben. Wirtschaftlich günstigste Nischen für einen Markteintritt sind insbesondere dann gegeben, wenn die Anlagen als Grundlastsysteme eingesetzt werden und durch Spitzenlasterzeuger für Wärme (z. B. Gaskessel) und Kälte (z. B. elektrisch betriebene Kältemaschine) ergänzt werden. Die planerische und betriebstechnische Zusammenführung der Anlagenkomponenten stellt nach wie vor eine Herausforderung dar und wird weitere Arbeiten bis zur Standardisierung für eine erfolgreiche Breitennutzung erfordern.

Das Projekt wurde durch die Europäische Kommission gefördert.



Wärmequelle Erdreich

NEUBAU 3,9

BESTAND 3,3

Wärmequelle Außenluft

NEUBAU 2,9

BESTAND 2,6

2

WÄRMEPUMPENANLAGEN IM FELDTTEST: ANALYSE DER SYSTEME IN DER PRAXIS

Wärmepumpensysteme gewinnen sowohl in Neubauten als auch in sanierten Gebäuden immer größere Marktanteile bei der Heiz- und Warmwasserbereitung. Es ist wichtig, die reale Effizienz der Systeme zu kennen, um diese nach ökologischen, energetischen und ökonomischen Gesichtspunkten zu beurteilen. Wir führen daher seit mehreren Jahren Feldtests von Wärmepumpenanlagen durch. Zwei breit angelegte Feldtests wurden in diesem Jahr beendet, ein neues Projekt ist gestartet.

Danny Günther, Thomas Kramer, Thomas Lechner, **Marek Miara**, Benedikt Mayerle, Christel Russ, Jakub Wewior, Hans-Martin Henning

2006 bis 2010 wurde im Rahmen zweier Projekte eine große Anzahl von Wärmepumpen im realen Einsatz durch das Fraunhofer ISE vermessen. Dabei wurden mit hoher zeitlicher Auflösung Volumenströme, Temperaturen, Wärmemengen und Stromverbräuche erfasst und ausgewertet. Aus den Messergebnissen haben wir Kennwerte, das Systemverhalten und Korrelationen zu Anlagenstammdaten abgeleitet.

Im Feldtest »WP-Effizienz« wurden ca. 110 Wärmepumpen in neuen Einfamilienhäusern vermessen. In Zusammenarbeit mit sieben Wärmepumpenherstellern und den Energieversorgern EnBW und E.ON Energie untersuchten wir, wie effizient elektrische Wärmepumpen den Wärmebedarf von neu gebauten Einfamilienhäusern decken können. In einem weiteren, von der E.ON Energie AG finanzierten Projekt, wurden ca. 70 Wärmepumpen in unsanierten Bestandswohngebäuden untersucht. Das Fraunhofer ISE hat neben der Effizienz der eingesetzten Wärmepumpen die Sicherung der Wärmeversorgung der Gebäude geprüft und einen ökologischen und wirtschaftlichen Vergleich zum Einsatz einer Ölheizung durchgeführt. Bei der Mehrzahl der untersuchten Wärmepumpen dienen die Anlagen sowohl zur Raumheizung als auch zur Trinkwasser-

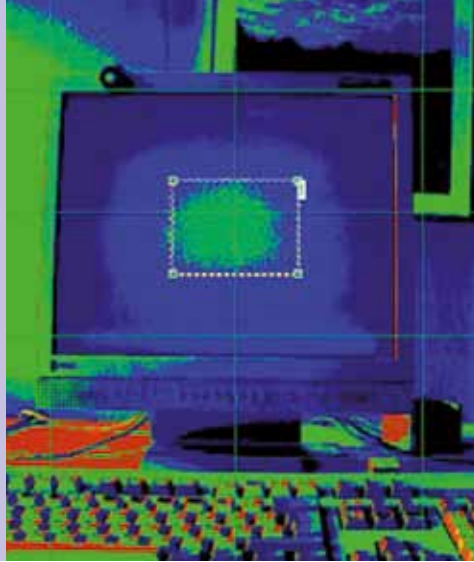
1 Ein Mitarbeiter des Fraunhofer ISE installiert die Messtechnik an einer Wärmepumpenanlage.

2 Ergebnisse des Feldtests: mittlere Arbeitszahlen für die Solel/Wasser- und Luft/Wasser-Wärmepumpen aus dem Projekt »WP-Effizienz« (Neubau) und »WP im Gebäudebestand« (Bestand).

erwärmung. Die Effizienzkennwerte (Arbeitszahlen) wurden in beiden Projekten mit identischer Systematik ermittelt. Bezogen auf den Stromverbrauch wurden die Wärmepumpe selbst, die Solepumpe bzw. die Ventilatoren und die elektrische Zusatzheizung (z. B. Heizstab) berücksichtigt. Die erzeugte Wärme wurde direkt im Anschluss an die Wärmepumpe gemessen. Unsere Untersuchungen haben gezeigt, dass die Wärmepumpensysteme grundsätzlich in der Lage sind, mit einer Effizienz zu arbeiten, die insgesamt zu einer ökologischen Überlegenheit gegenüber fossilen Systemen führt. Allerdings ist eine hohe Effizienz nicht automatisch gewährleistet. Es gibt eindeutige Kriterien, die bereits bei der Auswahl des Wärmepumpensystems eine wichtige Rolle für die Effizienz spielen, z. B. die Wärmequelle und das Wärmeverteilungssystem. Auch die Planung, die Installation und der Betrieb der Anlagen sind oft entscheidend für die tatsächlich erreichte Effizienz und damit die ökologische und ökonomische Sinnhaftigkeit der Wärmepumpenanlagen.

Im Rahmen des Projekts »WP Monitor« führen wir nun eine weitere unabhängige und hochqualitative Vermessung von rund 100 Wärmepumpen durch. Die wesentlichen Größen zur Ermittlung der Jahresarbeitszahlen und zur Abbildung des Betriebsverhaltens werden minutengenau gemessen. Zur Verfügung stehen serienmäßig erhältliche Wärmepumpen von zwölf deutschen und österreichischen Herstellern.

Das Projekt »WP-Effizienz« wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.



MODELL ZUR OPTIMIERUNG DES VISUELLEN KOMFORTS IN BÜROGEBÄUDEN

Für ein energieeffizientes Design und zur Unterstützung der Tageslichtnutzung in Bürogebäuden ist ein hoher visueller Komfort notwendig. Ein wesentlicher Aspekt ist die Vermeidung von Schleierblendung auf Bildschirmen. Die Reflexion von umliegenden Lichtquellen und Objekten auf dem Bildschirm kann zu einer signifikanten Kontrastminderung führen. Am Fraunhofer ISE haben wir deshalb eine neue Methode zur Bewertung der Schleierblendung auf Displays entwickelt.

Niloofer Moghbel, Jan Wienold, Hans-Martin Henning

Ergebnisse einer Nutzerakzeptanzstudie zeigen, dass sich bestehende Empfehlungen zur Begrenzung der Fensterleuchtdichte nicht eignen, um die Bildschirmqualität bzw. die Lesbarkeit auf dem Bildschirm zu bewerten. Dies unterstreicht den Bedarf eines neuen Verfahrens, mit dem auch dieser Aspekt des visuellen Komforts bewertet werden kann. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schleierblendung ein gutes Kriterium hierfür sein kann. Diese tritt dann auf, wenn das Kontrastverhältnis zwischen Bildschirmvordergrund und Bildschirmhintergrund kleiner ist als der Minimalkontrast. Aus diesem Grund wird für die Bewertung der Schleierblendung zunächst ein zuverlässiges Modell für den Minimalkontrast benötigt. Die aktuellen Normen (ISO / FDIS 9241-303) legen den Minimalkontrast wie folgt fest: $CR_{\min} = 2,2 + 4,84 * L_L^{-0,65}$. CR_{\min} beschreibt das Leuchtdichteverhältnis zwischen Vorder- und Hintergrund, das notwendig ist, um eine visuelle Aufgabe am Bildschirm auszuführen. L_L (Low State Luminance) bezieht sich auf die Leuchtdichte des schwarzen Zeichens am Bildschirm. Dieses Modell basiert auf einer experimentellen Studie aus den 1940er Jahren. Die damalige Versuchsdurchführung ist weit entfernt von den Gegebenheiten heutiger Büronutzung.

Nach unserer Kenntnis gibt es bislang keine Studie, die die Zuverlässigkeit dieses Modells für die Bildschirmbewertung

1 *Verschiedene beispielhafte Abbildungen: simuliertes Bild (links) und Leuchtdichte-Bild (rechts).*

in realer Büroumgebung nachweist. Aus diesem Grund haben wir eine Nutzerakzeptanzversuchsreihe entwickelt, die sowohl unter Tageslichtverhältnissen als auch bei künstlicher Beleuchtung durchgeführt wurde. Die durchgeführten Tests sollten einer realen Bildschirmarbeit sehr nahe kommen. Dieser Test (RC-Test) beruht auf einer Leseaufgabe. Wir testeten drei Altersgruppen mit je 15 Probanden (20–30, 40–50 und 60–70 Jahre) bei zwei verschiedenen Transmissionsgraden der Verglasung (8 % und 54 %). Hauptziel war es zu beurteilen, wie gut das vorhandene Standardmodell des Mindestkontrasts mit den subjektiven Ergebnissen korreliert. Falls erforderlich, sollte das vorhandene Modell verbessert oder ein neues entwickelt werden. Die Ergebnisse zeigten eine geringe Korrelation zwischen den subjektiven Bewertungen der Testpersonen und dem Kontrast-Standardmodell (Korrelationskoeffizient nach Pearson ca. 38 %). Basierend auf dem Originalmodell haben wir daher ein neues Modell entwickelt, das eine neue Variable beinhaltet. Legt man dieses zugrunde, verbessert sich die Korrelation mit den subjektiven Bewertungen signifikant (Pearson-Korrelationskoeffizienten ca. 98 %).

Der nächste Schritt ist die Entwicklung eines neuen computergestützten Verfahrens zur Bewertung der Schleierblendung basierend auf diesem neuen Modell. Es ermöglicht uns, einen Schleierblendungsindex für jeden Bildschirm unter beliebigen Lichtverhältnissen abzuschätzen und die Schleierblendung für folgende Anwendungsgebiete zu minimieren:

- Verbesserung der Bürogestaltung: beste Lage/Orientierung des Schreibtischs, beste Lage/Orientierung des Bildschirms
- Verbesserung des Fassadendesigns: Form, Dimension und Transmission
- Verbesserung des Designs der Tageslichtsysteme und Sonnenschutzsysteme: Design im Voraus, Optimierung der Regelstrategie



ALTERUNGSUNTERSUCHUNG VON POLYMERMATERIALIEN IN PV-MODULEN

Polymermaterialien werden in PV-Modulen für den Schutz der Zellen sowie für die elektrische Isolation eingesetzt. Sie sind dabei häufig extremen Umwelteinflüssen, z. B. starken Temperaturschwankungen, UV-Strahlung und Feuchtigkeit, ausgesetzt, was zu einer Beeinträchtigung der Funktionalität führen kann. Die Untersuchung der Degradationsprozesse des Einkapselungsmaterials ist daher von großer Bedeutung. Sie liefert wichtige Informationen für die Gestaltung realitätsnaher, schneller und günstiger beschleunigter Alterungsprüfungen, die eine Gebrauchsdauer von 20 Jahren innerhalb nur weniger Monate simulieren können.

Philipp Hülsmann, Thomas Kaltenbach, **Michael Köhl**, Cornelia Peike, Karl-Anders Weiß, Harry Wirth

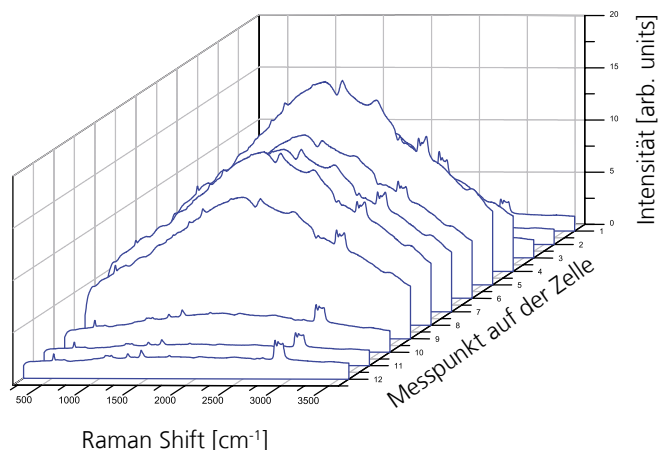
Die Raman-Spektroskopie ermöglicht eine optische, zerstörungsfreie Analyse von Polymeren durch die Verglasung. Die ortsaufgelöste Vermessung des Einkapselungsmaterials Ethylenvinylacetat (EVA) unterschiedlich bewitterter PV-Module detektiert sowohl die Unterschiede zwischen der Wirkung verschiedener Degradationsfaktoren (Feuchte, UV-Strahlung) als auch inhomogene Veränderungen zwischen Zelle und Verglasung. Ursache hierfür sind Diffusionsprozesse, die Abbaureaktionen wie die Hydrolyse initiieren, bei der fluoreszierende Chromophore als Degradationsprodukte entstehen. Dies führt im weiteren Verlauf der Alterung nach Jahrzehnten zu einer Vergilbung. Im Randbereich der Zellen laufen offensichtlich auch Prozesse ab, die der Vergilbung des Einkapselungsmaterials entgegenwirken (Photobleaching).

Abb. 2 zeigt Raman-Spektren, die äquidistant (10 mm) entlang einer Linie parallel zum Grid über einer Zelle gemessen wurden. Nach 2jähriger Expositionszeit in den Tropen ist visuell keine Veränderung der Einkapselung zu erkennen und die Minderung der elektrischen Leistung liegt an der Grenze des

1 Freibewitterungsteststand in Pozo Izquierdo (Gran Canaria).

Messfehlers. Zu erkennen ist der überlagerte starke Fluoreszenzuntergrund in der Zellmitte, der von den Chromophoren (Abbauprodukte) herrührt. An den Zellrändern hat die Permeation von Sauerstoff durch die Rückseitenfolie zur Oxidation dieser Degradationsprodukte geführt und es wird nahezu das ungestörte EVA-Spektrum sichtbar. Der steile Übergang zum fluoreszierenden Teil markiert die Lage der Busbars, die offenbar eine Diffusionsbarriere bilden. Vergleichende Messungen an baugleichen Modulen, die in unterschiedlichen Klimaten freibewittert oder auf verschiedene Arten beschleunigt gealtert wurden, sollen Korrelationen zwischen dem Betrieb im Freiland und Laborprüfungen herstellen.

Das Clusterprojekt »Zuverlässigkeit von PV Modulen 2« wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und den Firmen Schott Solar, Solarfabrik, Solarwatt, Solarworld, Solon gefördert.



2 Raman-Spektren des Einkapselungsmaterials EVA, entlang einer Linie parallel zum Grid über eine Zelle gemessen. Das Modul war zwei Jahre in den Tropen exponiert.

BESSER MIT GUTER OPTIK



ANGEWANDTE OPTIK UND FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN

Solare Energiesysteme wandeln Solarenergie, die in Form von elektromagnetischer Strahlung auf die Erde trifft, in thermische, elektrische oder chemische Energie um. Wir entwickeln optische Komponenten und Systeme, um die Solarstrahlung je nach Anforderung besser zu transmittieren, zu reflektieren, zu absorbieren, zu filtern, zu lenken oder zu konzentrieren.

Dabei stellen die große Bandbreite des solaren Spektrums mit Wellenlängen von 0,3–2,5 μm sowie die Notwendigkeit der großflächigen und kostengünstigen Herstellung von optischen Komponenten und Systemen vielfältige Herausforderungen dar. Um diesen zu begegnen, verfolgen wir neuartige Lösungsansätze, die ein Zusammenführen von Materialforschung, optischem Design und Fertigungstechnik erfordern. Für die erfolgreiche Umsetzung in neue Produkte der Solartechnik ist neben optischem Know-how, Kenntnis der Materialeigenschaften und enger Zusammenarbeit mit unseren Kunden auch eine umfassende spezifische Kenntnis der entsprechenden solaren Energiesysteme erforderlich – eine Voraussetzung, für die am Fraunhofer ISE besonders gute Synergien vorhanden sind.

Das Geschäftsfeld »Angewandte Optik und funktionale Oberflächen« bedient als Querschnittsthema mehrere Marktsegmente der Solartechnik: Fenster und Fassaden, solarthermische Kollektoren, Konzentratorsysteme für die Photovoltaik und für solarthermische Kollektoren. Unsere Expertise wird aber ebenso bei Kunden geschätzt, die nicht aus der Solarbranche kommen. So unterstützen wir auch die Licht- und die Displaytechnik.

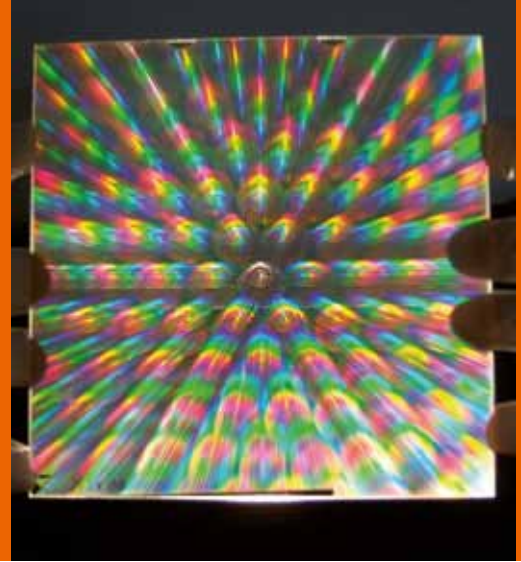
Die effektive Regelung des solaren Licht- und Energiestroms in der Fassade ist bei großflächig verglasten und energieeffizienten Gebäuden sehr wichtig. Schaltbare Beschichtungen auf Fensterscheiben erlauben es, die Transmission der Fenster über eine große Bandbreite zu verändern. Als nicht-mechanische Sonnenschutzsysteme bieten sie z. B. Vorteile bezüglich

Durchsicht und Anfälligkeit gegenüber Wind. Gaschrome Verglasungen, bei denen die Absorption über weite Bereiche einstellbar ist, sind inzwischen ausgereift und in Demonstrationsfassaden mit der gesamten dazugehörigen Systemtechnik erfolgreich getestet worden.

Verglasungen mit sehr guter Wärmedämmung können mit hochtransparenten, aber niedrig emittierenden low-e Schichten und Edelgasfüllung erreicht werden, aber auch mit Vakuum oder transparenten Wärmedämmmaterialien. Bei sehr hohem Dämmwert zeigen sie an bestimmten Wintertagen Beschlag und sogar Befrostung an der Außenseite. Um diese unerwünschten Nebeneffekte zu reduzieren, werden niedrig emittierende, stabile Schichten für die Außenseite der Verglasung entwickelt.

Mikrostrukturierte Oberflächen ermöglichen Sonnenschutzsysteme, die unerwünschte direkte Solarstrahlung reflektieren und dennoch diffuses Tageslicht durchlassen. Photonische Gitter und Lighttrapping-Strukturen erhöhen die Effizienz von organischen und Siliciumsolarzellen. In photovoltaischen Konzentratormodulen wird die Solarstrahlung auf kleinflächige Hochleistungssolarzellen konzentriert. Wir optimieren Konzentratoroptiken hinsichtlich Wirkungsgrad und Kosten.

Das mikro-optische Know-how und die großflächige Interferenzlithographie haben für das Fraunhofer ISE ein Anwendungsgebiet außerhalb der Solartechnik interessant werden lassen: die Displaytechnik. Hier arbeiten wir an mikrostrukturierten Kunststoff-Filmen, die eine höhere Helligkeit und einen besseren Kontrast von Displays erlauben. Lichtlenkung und Lichtstreuung in abbildenden und nichtabbildenden Optiken ist zentrales Thema in der Lichttechnik. Aufbauend auf unseren Arbeiten im Bereich der Tageslichttechnik bieten wir unsere Expertise zu optischen Material- und Oberflächeneigenschaften auch für optisches Design in der Kunstlichttechnik an.



In den vergangenen Jahren haben wir unsere Modellierungsverfahren kontinuierlich erweitert. Sie umfassen grundlegende physikalische Modelle wie Effektiv-Medium-Theorien, rigorose und skalare Beugungstheorie, Streutheorien, Dünnschichtmethoden, geometrische und nichtabbildende Optik sowie Planungswerkzeuge z. B. für die Leuchtenplanung. So können wir bei Anfragen unserer Kunden die Machbarkeit einer gewünschten optischen Komponente schnell und effizient klären. Als Fertigungsverfahren stehen uns Vakuumbeschichtungsverfahren und Mikrostrukturierungsverfahren zur Verfügung. Die verfügbaren Charakterisierungsmethoden bieten neben den Standardverfahren auch spezialisierte Sonderaufbauten, z. B. zur Bestimmung der Formtreue von Spiegeln mit Rasterstreifenreflektometrie oder des Verschmutzungsgrads von Spiegeln. In guter Zusammenarbeit mit anerkannten Forschungseinrichtungen innerhalb und außerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft komplettieren wir unser Angebot, wann immer dies notwendig wird.

Besondere Einrichtungen:

- Vakuumbeschichtungsanlage zur industrienahen Herstellung großflächiger (140 x 180 cm²) komplexer Schichtsysteme
- Interferenzlithographieanlagen zur homogenen Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen auf Flächen von bis zu 120 x 120 cm²
- optische Messtechnik: Spektrometrie, Goniometrie, Streulichtmessung, Brechzahlbestimmung, Leuchtdichtemessungen mit bildgebenden Verfahren, Streifenreflektometrie, Sonderaufbauten für Konzentratoroptiken, Qualitätssicherung in der Produktion
- Oberflächencharakterisierung: optische Profilometrie, Rasterelektronenmikroskopie, Rasterkraftmikroskopie, Augerelektronenspektroskopie

Definierte Oberflächentexturen werden eingesetzt, um höchste Wirkungsgrade in der Photovoltaik zu erreichen. Das Bild zeigt einen mittels Interferenzlithographie strukturierten Photolack auf einem Glassubstrat bei rückseitiger Beleuchtung. Diese Oberflächenstruktur dient als Urform für die Herstellung der Honeycombtexur auf multikristallinem Silicium mittels Nanoimprint-Lithographie (s. Beitrag S. 40 ff.). Am farbigen Beugungsbild kann man die Wirkungsweise der hexagonalen Struktur erkennen: Strahlung aus einem breiten Spektral- und Winkelbereich wird effizient eingekoppelt und abgelenkt. In der Solarzelle führt das zu minimalen Reflexionsverlusten und einer hohen Absorption.

ANSPRECHPARTNER

Beschichtungen – Technologien und Systeme	Dipl.-Phys. Wolfgang Graf	Telefon +49 761 4588-5946 wolfgang.graf@ise.fraunhofer.de
Mikrostrukturierte Oberflächen	Dr. Benedikt Bläsi	Telefon +49 761 4588-5995 benedikt.blaesi@ise.fraunhofer.de
Fassaden und Fenster	Dipl.-Phys. Tilmann Kuhn	Telefon +49 761 4588-5297 tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de
Lichttechnik	Dr. Jan Wienold	Telefon +49 761 4588-5133 jan.wienold@ise.fraunhofer.de
Konzentratoroptik	Dr. Peter Nitz	Telefon +49 761 4588-5410 peter.nitz@ise.fraunhofer.de



ENERGIEEINSPARUNG DURCH ANTI-BESCHLAGBESCHICHTUNG BEI KÜHLMÖBELN

In Supermärkten hat die Lebensmittelkühlung, z. B. in Gefrierschränken oder Kühlregalen, einen beachtlichen Anteil am Gesamtstromverbrauch. Ein Hindernis bei der Entwicklung energiesparender Verkaufskühlmöbel ist die Forderung, dass die Ware für Kunden jederzeit gut sichtbar sein soll. Das Beschlagen der Glastüren stellt hierbei bislang ein Problem dar.

Franz Brucker, **Wolfgang Graf**, Werner Platzer

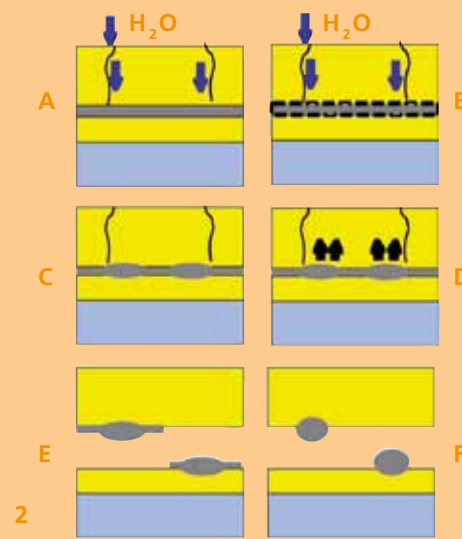
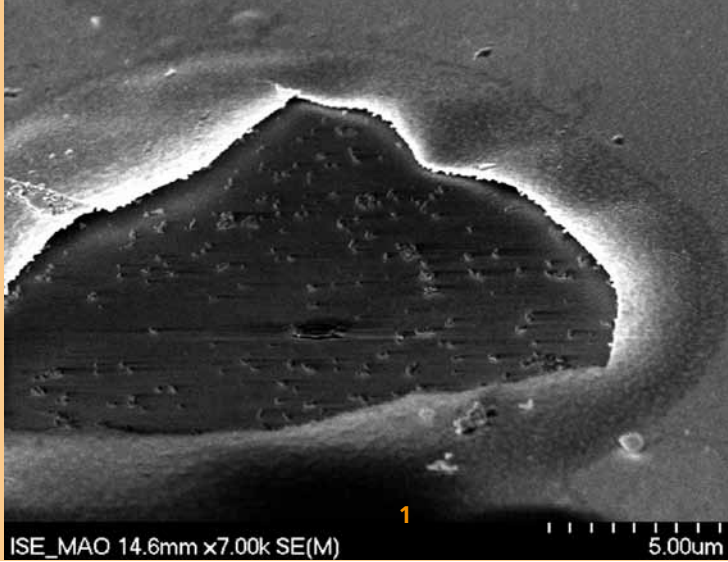
1 Blick durch die Tür eines Gefrierschranks nach Beschlagen durch Öffnen und Schließen der Tür mit sechs unterschiedlichen Antibeschlagbeschichtungen, Variante 3 ist die Referenz ohne Beschichtung.

In einem Supermarkt wird typischerweise 60 % des Strombedarfs für Kühlung verbraucht. Ein beachtlicher Teil davon fließt in den Betrieb von Tiefkühlschränken. Bei diesen werden üblicherweise doppelverglaste Türen eingesetzt. Die Innenseite der Tür wird hierbei so kalt, dass es beim Öffnen der Tür zur Kondensatbildung kommt. Diese verbleibt nach dem Wiederschließen, trübt so die Sicht auf die Ware und behindert den Abverkauf.

Eine klassische Lösung dieses Problems ist der Einsatz elektrischer Heizungen, die den Taupunkt in den Türen lokal erhöhen. Dies führt jedoch zu einem hohen Energieverbrauch. Es wurden daher in zahlreichen Versuchsreihen mehrkomponentige Beschichtungen entwickelt, die den Beschlag auf der kalten Innenseite der Tür unterdrücken, ohne dass hierfür Energie verbraucht werden muss. Dabei wurden verschiedene Trägerschichten und Beschichtungskomponenten variiert und optimiert. Die Entwicklung stellt einen wichtigen Schritt auf dem Weg zu energiesparsameren Kühlmöbeln dar.

Die wesentlichen Herausforderungen waren u. a. die tiefen Temperaturen weit unter dem Gefrierpunkt sowie die mechanischen Belastungen durch z. B. Kunden und Personal in einem Supermarkt. Abb. 1 zeigt den Blick durch die Tür eines Gefrierschranks. Zu erkennen sind sechs Proben mit unterschiedlichen Mengen Kondensat nach Öffnen der Tür. Das Feld mit der Nummer 3 stellt die Referenz ohne eine Beschichtung dar. Hier erkennt man einen starken Beschlag. Nummer 4 ist dagegen weitgehend beschlagfrei.

Die Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.



KORROSIONSMECHANISMUS VON LOW-E SCHICHTEN MIT SILBER ALS IR-REFLEKTOR

Low-e Schichten mit Silber werden auf der Innenseite des Scheibenzwischenraums von Verglasungen zur Verbesserung der Wärmedämmung eingesetzt. Für den Einsatz dieser low-e Schichten auf der Außenseite des Fensters wurde am Fraunhofer ISE der Korrosionsmechanismus untersucht.

Andreas Georg, Wolfgang Graf, Werner Platzer

Ein typischer Schichtaufbau von low-e Schichten mit Silber als IR-Reflexionsschicht besteht aus mehreren Oxidschichten, die die Transmission der ca. 10 nm dünnen Silberschicht durch Interferenzwirkung erhöhen. Silber ist eigentlich ein Edelmetall. Dennoch spielt bei der Korrosion dünner Silberschichten die Oxidation des Silbers an der Grenzfläche zu einbettenden Oxidschichten eine Rolle, was über den Vergleich der Korrosion mit unterschiedlichen Oxidschichten und verschiedenen korrosiven Medien herausgestellt werden konnte.

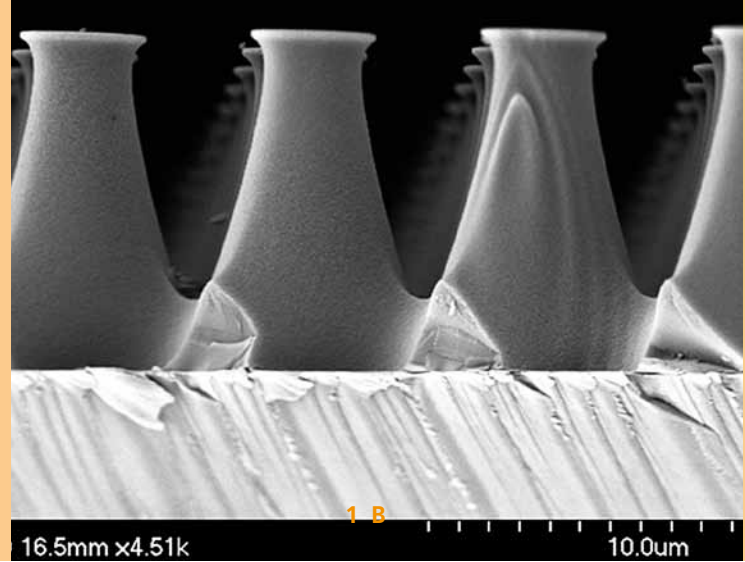
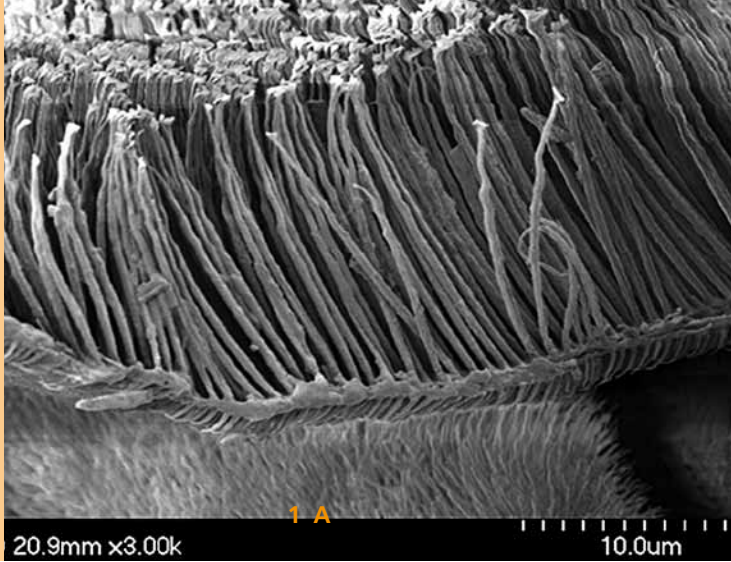
Die Degradation der Silberschichten äußert sich in einer lokalen Ablösung der Einbettungsschicht und einer Agglomeration des Silbers. Abb. 1 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme eines typischen Defekts an einem Silberschichtsystem nach längerer Kondensation. Man erkennt die fortschreitende Ablösung der Einbettungsschicht. Die verbleibenden hell erscheinenden Partikel sind agglomerierte Silberpartikel. Im Lichtmikroskop findet man meist ein Staubpartikel o. ä. als Ausgangspunkt für diese Lochkorrosion. Für den Mechanismus der Korrosion ist auch die Anwesenheit von Feuchte wesentlich (Abb. 2). Wasser dringt über Poren oder Risse in

- 1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer in Oxidschichten eingebetteten Silberschicht nach Korrosion.
- 2 Schematische Darstellung des Mechanismus der Korrosion dünner Silberschichten eingebettet in Oxidschichten an feuchter Luft.

die Einbettungsschicht (gelb) ein und gelangt zur Grenzfläche Einbettungsschicht-Silberschicht (grau) (A). Sauerstoff wird als OH-Ion gelöst und kann so ebenfalls an die Grenzfläche gelangen. An dieser Grenzfläche startet nun eine Oxidation des Silbers, was die Grenzflächenenergie herabsetzt (B). Dies wird durch saure Medien verstärkt.

Silberschichten weisen bereits in sich eine Neigung zur Agglomeration auf. Stellt man z. B. Silberschichten ohne einbettende Oxidschichten her, dann agglomerieren die Silberschichten wesentlich schneller in Folge eines korrosiven Angriffs als mit Einbettungsschicht. Ebenso fördert eine erhöhte Temperatur die Bildung der Agglomerate. Durch die Einbettung in Oxidschichten wird eine Grenzflächenenergie erzeugt, die dieser Agglomeration entgegenwirkt. Dies kann durch zusätzliche Haftschichten verstärkt werden. Nach Schwächung der Grenzfläche vermag das Silber zu migrieren (C) und baut zusätzliche Spannungen auf, was durch intrinsische Spannungen in den Einbettungsschichten verstärkt werden kann (D). Dies führt zu einer Ablösung der Einbettungsschicht (E) und dann zu einer weiteren Agglomeration des Silbers (F).

Die Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.



MIKROSTRUKTUREN FÜR ADHÄSIVE OBERFLÄCHEN

Adhäsive Oberflächen, die auf Klebstoffe verzichten, sind für viele Anwendungen interessant. Von medizinischen Produkten über Roboter bis hin zu Alltagsgegenständen können diese eingesetzt werden. Als Vorbild für die mikrostrukturierten Oberflächen dient die Natur und hier insbesondere der Gecko, der durch sehr feine Härchen auf den Fußsohlen an fast beliebigen Oberflächen haftet. Mit unseren Mikrostrukturierungsmethoden stellen wir Oberflächen nach diesem Gecko-Prinzip her.

Benedikt Bläsi, Claas Müller*, **Michael Nitsche**,
Christine Wellens**, Werner Platzer

* IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, ** PSE AG

Seit langem nehmen sich die Menschen die Natur zum Vorbild und versuchen deren Fähigkeiten nachzuahmen. Im Projekt »Gecko« haben wir Strukturen hergestellt, die wie die Füße des Geckos an Oberflächen haften können. Der Gecko bedient sich einer Mikrostruktur an seinen Fußsohlen, die es ermöglicht, viele kleine Kontaktpunkte zu einer Oberfläche aufzubauen.

Als Geometrie für die Haftstrukturen hat sich eine Säule mit einer Verbreiterung im oberen Bereich als besonders wirksam herausgestellt. Der Kontaktbereich muss aber trotzdem weiterhin flach bleiben. Ein solcher Hinterschnitt stellt besondere Anforderungen an die Herstellung und Replizierung der Strukturen. Im Rahmen dieses Projekts wurden Verfahren entwickelt, mit denen sich solche Strukturen herstellen lassen.

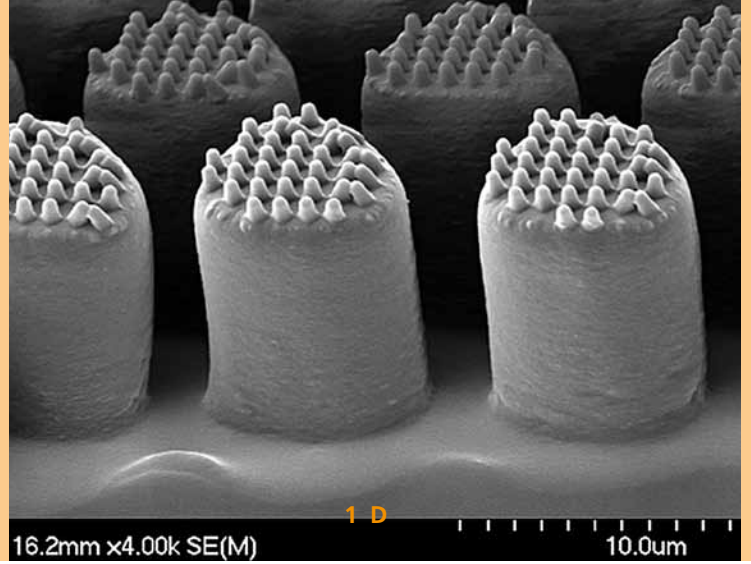
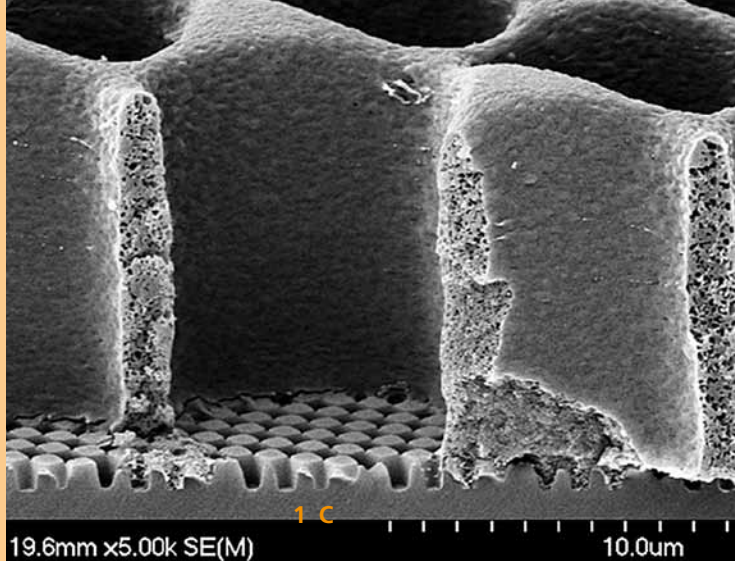
Adhäsion an rauen Oberflächen stellt eine besondere Herausforderung dar. Hierfür müssen die Säulen besonders lang und dünn sein, um sich möglichst gut an die Oberfläche anzupassen. Hierarchische Strukturen haben hier den Vorteil, dass sie kleine Kontaktpunkte mit der nötigen mechanischen Stabilität

vereinen, die sie durch die darunterliegenden, breiteren Säulen erhalten. Somit sind größere Aspektverhältnisse möglich als dies ohne Hierarchie möglich wäre. Um diese Strukturen herzustellen, haben wir einen Prozess entwickelt, bei dem Strukturen mit einem Mikrometer Periode auf acht Mikrometer breiten Säulchen platziert werden.

Als Methode für die Herstellung der Strukturen setzen wir Interferenzlithographie und Nanoimprint-Lithographie ein. Durch Belichtung und Entwicklung eines Photopolymers mit der Interferenzlithographie werden die Strukturen erzeugt. Die spezielle Auswahl und Prozessierung dieses Materials kann die Form der erreichten Strukturen beeinflussen. Für die benötigten großen Aspektverhältnisse haben wir sehr empfindliche und kontraststarke Materialien gewählt.

Ist die Urform durch Interferenzlithographie hergestellt, wird diese mit flexiblen und festen Polymeren repliziert. Bei jedem Replizierungsschritt entsteht das inverse Profil der abzuformenden Struktur. Auf ein solches Replikat wird dann eine neue Schicht Photolack aufgetragen und die zweite Hierarchieebene belichtet. Ebenso wird die fertige Struktur in ein flexibles Polymer repliziert. Dies ist nötig, da der Gecko-Effekt auf flexiblen Materialien basiert. Hierzu haben wir eine Vielzahl von Materialien auf ihre Verträglichkeiten getestet und Prozesse etabliert, die es ermöglichen, selbst Hinterschnitte zu replizieren.

Um die Auswahl der Materialien und das Finden der Prozessparameter zu unterstützen, wurde ein neuer Simulationsansatz entwickelt, bei dem die optischen Eigenschaften der verwendeten Photoresistmaterialien besser als bisher berücksichtigt werden. Hierfür wird bei der Simulation des Belichtungsprozesses zusätzlich die Beugung des Lichts an schon vorhandenen Strukturen berücksichtigt, was insbesondere für hierarchische Strukturen notwendig ist. Dadurch konnten



1 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen:

A: Härchen eines Geckofußes. Am oberen Ende sind diese verbreitert.

B: Künstlich hergestellte Geckostruktur, auch hier erkennt man die verbreiterten Köpfe.

C: Aufnahme der hierarchischen Struktur in Photoresist. Diese stellt das Negativ zu der gewünschten Struktur dar.

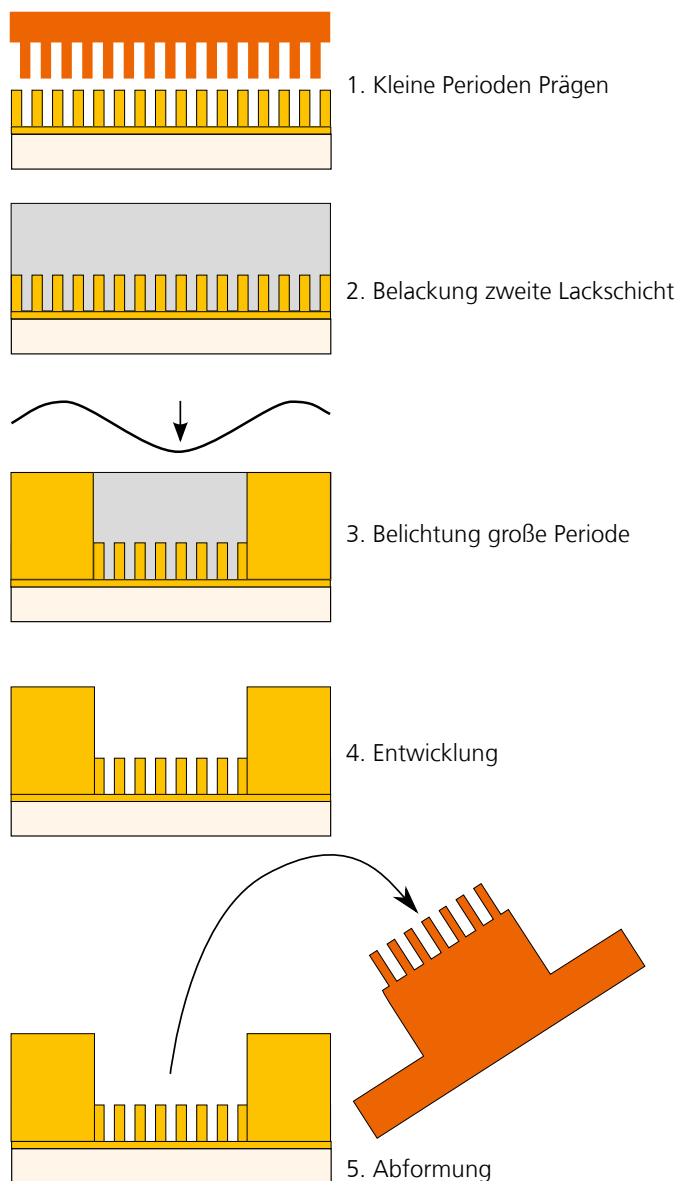
D: Aufnahme der hierarchischen Struktur in Silikon. Diese entstand durch Replikation der in Abb. 1C gezeigten Struktur.

Vorhersagen darüber getroffen werden, ob bestimmte Prozesse durchführbar sind.

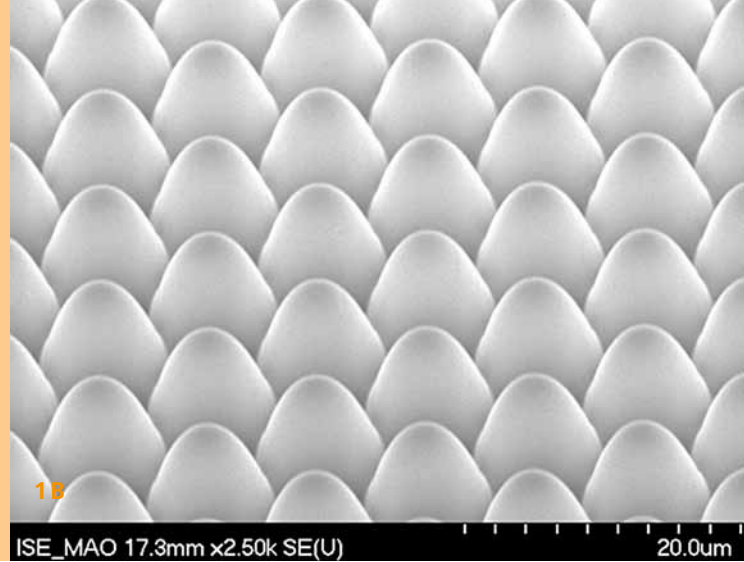
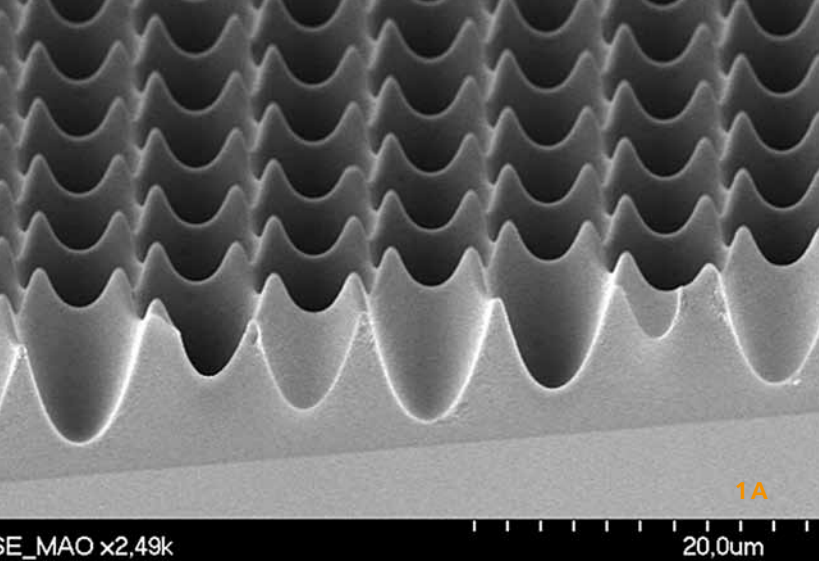
Durch die neuen Prozesse und Materialien haben wir unser Repertoire an Strukturen in Richtung kombinierter Strukturen mit senkrechten Seitenwänden erweitert. Kombinierte Strukturen haben den Vorteil, dass mehrere Funktionalitäten in einer Schicht vereint werden können. Speziell bei Oberflächen für optische Anwendungen ist dies von großem Interesse.

Die Erweiterung zu hohen Aspektverhältnissen und die Möglichkeit, auch Hinterschnitte zu replizieren, erweitern das Anwendungsspektrum unserer Technologie enorm. Deren Vorteil ist es, mikrostrukturierte Oberflächen auch großflächig ohne Nahtstellen zu strukturieren.

Das Projekt »Bioinspired Reversible Adhesives by Micro- and Nanopatterning Techniques« wird, als Verbundprojekt mit den Partnern Leibniz-Institut für Neue Materialien (INM) und BASF, durch die Volkswagen Stiftung gefördert.



2 Schematischer Prozessablauf zur Herstellung von hierarchischen Geckostrukturen. orange dargestellt ist Silikon, gelb belichteter Photoresist und grau unbelichteter Photoresist.

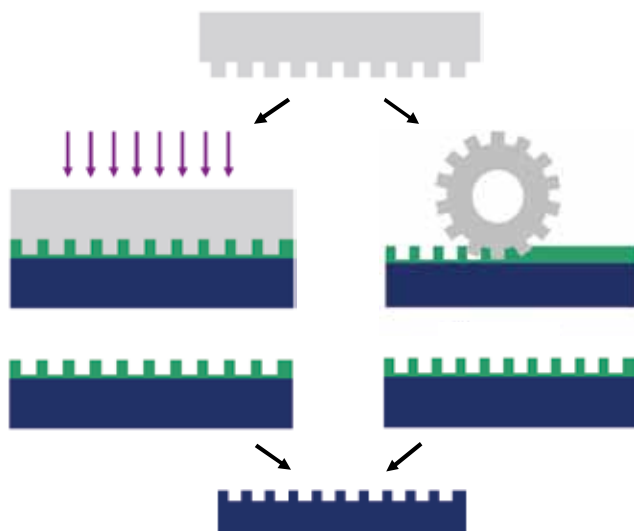


SILICIUMTEXTURIERUNG AM LAUFENDEN BAND

Im Projekt »Nanotex« entwickeln wir massentaugliche Prozesse zur Realisierung definierter Texturen für Si-Solarzellen. Die angewandte Rollen-Nanoimprint-Lithographie soll in einem Durchlaufverfahren die Honeycomb-Texturierung von multikristallinem Silicium ermöglichen. Ein weiteres Projektziel ist die Herstellung von Beugungsgittern auf der Solarzellerrückseite durch Sub-Mikrometer-Strukturen. Diese sollen speziell im von Silicium schwach absorbierten langwelligen Spektralbereich eine Erhöhung der Quanteneffizienz bewirken und so die prozesstechnischen Grenzen des Herstellungsverfahrens vorantreiben.

Benedikt Bläsi, Aron Guttowski, **Hubert Hauser**, Martin Hermle, Volker Kübler, Bernhard Michl, Claas Müller*, Marius Peters, Sebastian Schwarzkopf, Andreas J. Wolf, Werner Platzer

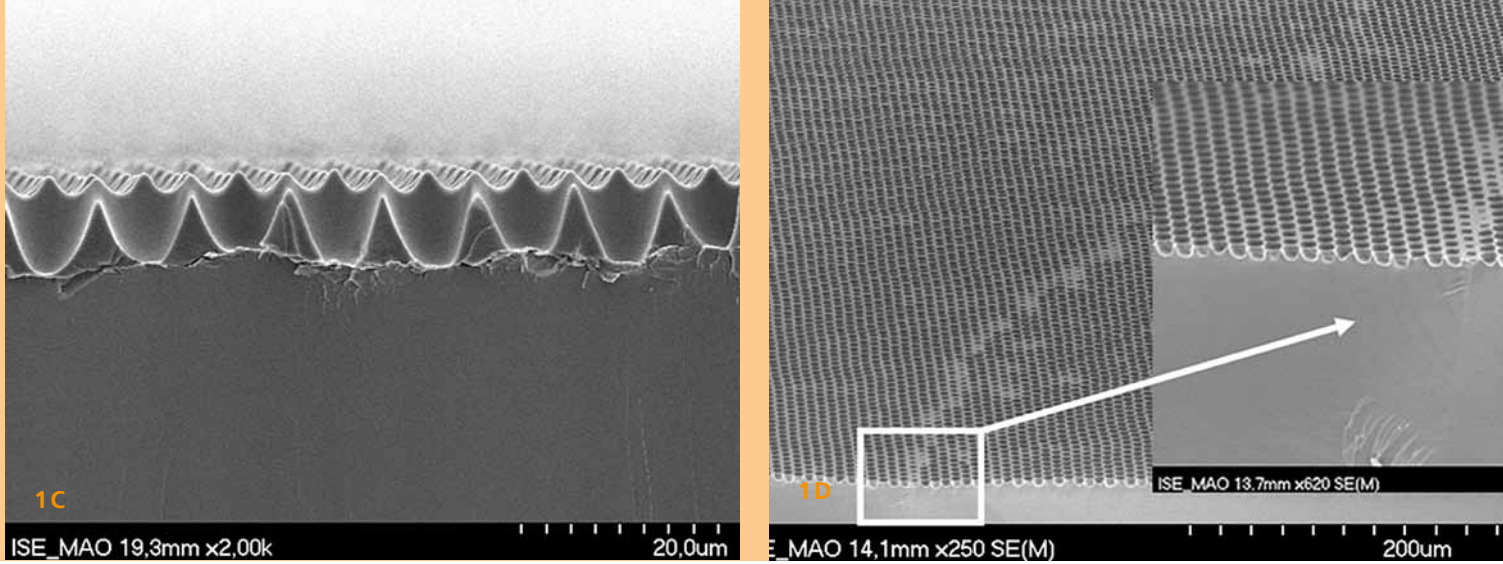
* IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



Die effizienzsteigernde Wirkung einer Texturierung der Vorderseite von Si-Solarzellen ist bereits seit den 60er Jahren bekannt. Die Texturierung bewirkt zum einen eine Reflexionsminderung aufgrund von Mehrfachreflexionen, zum anderen eine Wegverlängerung des Lichts innerhalb der Zelle aufgrund von Brechungseffekten. Im industriellen Maßstab kommen bisher lediglich maskenlose, stochastische und größtenteils nasschemische Ätzverfahren für die Texturierung der Si-Oberfläche zum Einsatz. Aufgrund der nicht einheitlichen Kristallorientierung in multikristallinem Silicium (mc-Si) werden hier vorwiegend isotrope Ätzverfahren eingesetzt. Diese führen zwar zu einer homogenen Textur und damit zu einem homogenen Erscheinungsbild, ihre reflexionsmindernde Wirkung ist jedoch jener von zufälligen Pyramiden auf monokristallinem Silicium (c-Si) weit unterlegen.

Als 2004 am Fraunhofer ISE mit einer Effizienz von 20,4 % der Weltrekord für mc-Si Solarzellen erreicht wurde, kam neben angepassten Höchsteffizienz-Prozessen für dieses Substratmaterial die so genannte Honeycomb-Texturierung der Vorderseite zum Einsatz. Da die im Labormaßstab verwendeten Prozesse rund um die Photolithographie zur Generierung eines solchen hexagonalen Musters für die Überführung in eine industrielle Fertigung zu kostspielig sind, konzipierten wir eine alternative Prozesskette zur Realisierung definierter Texturen. Diese alternative Prozesskette beruht auf der Strukturierung einer Ätzmaske in einem Stempelverfahren, der so genannten Nanoimprint-Lithographie (NIL).

2 Schematische Darstellung der Prozesskette zur Texturierung mittels Nanoimprint-Lithographie (NIL). Veranschaulicht sind die Varianten der NIL unter Verwendung eines planen Stempels sowie eines kontinuierlichen Rollenprägeprozesses.



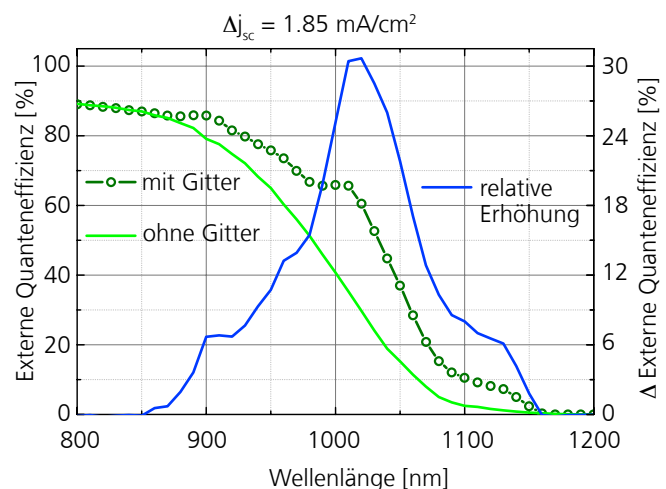
1 (A) Hexagonales Muster einer Periode von $8\ \mu\text{m}$ in einem Positiv-Photoresist nach der Interferenzlithographie. Diese Struktur wird als Master verwendet. (B) Silikonabformung dieses Masters (inverse Struktur), die als Stempel für die Nanoimprint-Lithographie (NIL) dient. (C) Mittels Rollen-NIL strukturierte Lackschicht auf einem rauen multikristallinen Si-Wafer. (D) Honeycomb-texturierte Obeffläche eines mc-Si Wafers nach Plasmaätzprozessen für den Strukturübertrag mit Vergrößerung einer Korngrenze.

Da es sich bei der NIL um ein Replikationsverfahren handelt, müssen zunächst so genannte Masterstrukturen hergestellt werden. Diese generieren wir mittels Interferenzlithographie, einem Verfahren, das eine Vielzahl verschiedener Strukturtypen mit Strukturgrößen von $100\ \text{nm}$ bis $100\ \mu\text{m}$ auf Substratgrößen bis zu $1\ \text{m}^2$ ermöglicht. Diese Masterstrukturen können mehrfach galvanisch repliziert werden, wodurch metallische Werkzeuge für die Stempelherstellung zur Verfügung stehen. In einem Abgussverfahren können die Stempel von diesen Werkzeugen abgeformt werden. Dann folgt der eigentliche massentaugliche Stempelprozess der Ätzmaske. Wir verwenden transparente und flexible Stempelmateriale, um UV-aushärtende Lacksysteme ganzflächig auf rauen mc-Si Substraten strukturieren zu können.

In der Gruppe »Mikrostrukturierte Oberflächen« haben wir zwei Anlagen für die NIL entwickelt und aufgebaut. Dabei wird in der Laborvariante ein Stempel in einem planparallelen Aufbau verwendet. In der zweiten Ausbaustufe ist der Stempel bereits auf einer Rolle angebracht, um einen kontinuierlichen Durchlaufprozess und so die Integration in Fertigungslinien zu ermöglichen. Rollenprägeverfahren stellen eine etablierte Technologie zur Strukturierung flexibler Folienmaterialien dar. Die Besonderheit des eigens entwickelten Rollen-NIL Aufbaus besteht in der Möglichkeit, Lackschichten auf starren, nicht-transparenten, rauen und bruchanfälligen Substraten zu strukturieren. Nachdem die Ätzmaske auf dem zu texturierenden Si-Substrat mittels NIL strukturiert ist, folgt ein Ätzübertrag der durch die Maske definierten Struktur. Abschließend müssen Lackreste entfernt werden und die Substrate können die restliche Prozesskette bis hin zur fertigen Solarzelle durchlaufen. Die Prozesskette zur Texturierung ist in Abb. 2 veranschaulicht. Im Rahmen des Projekts »Nanotex« wird diese auf der NIL

basierende Prozesskette nun für den Einsatz zur Texturierung waferbasierter, kristalliner Si-Solarzellen anhand zweier Modellierungen untersucht. Bei den Modellierungen handelt es sich zum einen um die bereits erwähnte Honeycomb-Texturierung von mc-Si (oder nicht Standard $\langle 100 \rangle$ c-Si) Substraten mit Strukturgrößen im Mikrometerbereich und zum anderen um die prozesstechnisch anspruchsvollere Realisierung von Sub-Mikrometer-Beugungsgittern auf der Substratrückseite. Beide Anwendungen dienen dem Lichtmanagement und sollen helfen, die Absorption und damit den generierten Strom der Zellen zu erhöhen. Abb. 3 zeigt eine Simulation der durch ein Beugungsgitter erhöhten Quanteneffizienz.

Die vorgestellten Arbeiten im Bereich der Modellierung sind Teil des Projekts »Photonic-Si«. Das Projekt »Nanotex« wird durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.



3 Ergebnisse elektro-optisch gekoppelter Simulationen einer Si-Solarzelle mit und ohne diffraktivem Rückseitengitter.

WÄRME, KÄLTE, STROM VON DER SONNE



SOLARTHERMIE

Solarthermische Systeme mit unterschiedlichen Arbeitstemperaturen finden Einsatz in der Gebäudetechnik in Wohn- und Geschäftsgebäuden, in der Industrie oder als Freilandanlagen. Die solar erzeugte Wärme kann entweder direkt genutzt oder über Wärmekraftmaschinen in Strom oder mittels thermischer Kältemaschinen in Kälte umgewandelt werden. Generell sind die beiden entscheidenden Faktoren für die Leistungsfähigkeit der Systeme der optische Strahlungstransport und die Minimierung der Wärmeverluste.

Das Geschäftsfeld »Solarthermie« umfasst den Markt von Nieder- bis Hochtemperaturanwendungen: Solarthermische Kollektoren und Kollektorsysteme mit Flach- und Vakuumröhrenkollektoren haben vielseitige Anwendungen von der Brauchwasser- und Solarheizungsanlage über die Kühlung und Klimatisierung bis hin zur seewasserfesten Entsalzungsanlage. Auch fassadenintegrierte Kollektoren und Fensterkollektoren werden eingesetzt. Mit linear konzentrierenden Kollektoren können Betriebstemperaturen von 150 °C bis zu 550 °C erreicht werden. Sowohl Rinnen- als auch Fresnelkollektoren werden nicht nur für die solarthermische Stromversorgung von Großkraftwerken eingesetzt, sondern auch in oft einfacheren und kostengünstigeren Varianten für die Erzeugung von Prozesswärme, Prozessdampf und Antriebswärme von Absorptionskältemaschinen.

Solarthermische Energiesysteme wandeln Solarenergie, die in Form von elektromagnetischer Strahlung auf die Erde trifft, in Wärme um. Dabei kann je nach Ausformung der solarthermischen Kollektoren eine Temperaturanhebung über die Umgebungswärme von wenigen Grad bis hin zu mehreren hundert Grad erfolgen. Je geringer die thermischen Verluste eines Empfängers, desto höher sind die möglichen Betriebstemperaturen. Optische Oberflächen und Materialien sind wichtig für die Realisierung effizienter Systeme. Hier liegt die Verbindung zum Geschäftsfeld »Angewandte Optik und funktionale Oberflächen«.

Selektive Absorberschichten solarthermischer Kollektoren (Temperaturen bis 230 °C) werden von uns seit vielen Jahren entwickelt und in die Industrie transferiert. Als Beschichtungen von Absorberrohren in solarthermischen Kraftwerken müssen solche Schichtsysteme aber wesentlich höhere Temperaturen (bis zu 650 °C) dauerhaft aushalten. Dafür werden abhängig von der Absorberrohrvariante zusätzliche Schichten als Diffusionsbarrieren in das Schichtsystem integriert.

Der Wirkungsgrad eines Kollektors hängt aber nicht nur von den Oberflächeneigenschaften ab, auch die strömungstechnischen Eigenschaften sowie die Wärmeübertragung innerhalb des Kollektors sind wesentlich. Eine gleichmäßige Durchströmung bei niedrigem Druckverlust bei Flachkollektoren wird mit unserem FracTherm®-Konzept aus der Bionik erreicht. Auf Basis dieses Ansatzes ergeben sich auch gänzlich neue Konstruktions- und Fertigungsmöglichkeiten für solarthermische Kollektoren.

Offene sorptionsgestützte Klimatisierungsverfahren können effektiv mit einfachen Flachkollektoren betrieben werden. Sie ermöglichen eine bedarfsgerechte Konditionierung der Frischluft in Bezug auf Temperatur und Luftfeuchte. Andere thermische Kühlverfahren benötigen zum Teil höhere Arbeitstemperaturen. Deswegen werden für die Optimierung des Gesamtsystems auch konzentrierende Kollektoren entwickelt und eingesetzt.

Solarthermische Kraftwerke besitzen in Ländern mit hoher Direktstrahlung ein riesiges Potenzial, Solarstrom sowohl für den Tagesspitzenbedarf als auch für die Grundlast kostengünstig zu erzeugen. Bei hohen Temperaturen wird Wasserdampf erzeugt, der wie in einem konventionellen Kraftwerk die Turbine antreibt. Deswegen können Solarfelder auch einfach in Hybrid-Kraftwerke integriert werden. Die nichtsolare Wärmeerzeugung kann beispielsweise auch regenerativ über Biomasse geschehen. Über Hybridisierung oder alternativ



über die thermische Speicherung können die Kraftwerke auch nachts Strom liefern. Normalerweise wird bei solaren Kraftwerken an Großprojekte von 20–400 MW_{el} gedacht. Wir untersuchen aber auch die Chancen von mittleren solarthermischen Anlagen im Industriemaßstab, deren Wirtschaftlichkeit über die Kraft-Wärme-(Kälte-)Kopplung und einfachere Betriebsbedingungen deutlich verbessert werden kann.

Das Fraunhofer ISE verfügt über alle benötigten Kompetenzen im Bereich Solarthermie von Materialwissenschaft, Komponentendesign, Test- und Prüfverfahren, theoretischer Modellierung und Simulation, Anlagenregelung bis hin zur Systemtechnik bei den verschiedenen Anwendungen.

Besondere Einrichtungen:

- Vakuumbeschichtungsanlage zur industrienahen Herstellung komplexer Absorber- und Spiegelprototypen auf planen und gekrümmten Flächen und Rohren (140 x 180 cm²)
- materialtechnische Messtechnik (REM, Auger, EDX) zur Untersuchung von Veränderungen der Schichten durch thermische oder anderen Belastungen
- optische Messtechnik: Spektrometrie, Goniometrie, Leuchtdichtemessungen mit bildgebenden Verfahren, Streifenreflektometrie, Sonderaufbauten für Konzentratoroptiken
- wärmetechnisches Labor zur Vermessung der Leistungsfähigkeit und des Transientenverhaltens von Wärmekraftmaschinen (bis etwa 50 kW_{el}) und Hochtemperaturspeichern
- Testlabor für die Leistungsprüfung bei Membrandestillation und Seewasserfestigkeit von Komponenten
- TestLab Solar Thermal Systems: zertifiziertes solarthermisches Prüflabor für Kollektoren und Systeme nach Solar Keymark (Leistungs- und Qualifizierungstests, Außen- und Innenprüfung, Mitteltemperaturvermessung bis 200 °C), auch geeignet für die Vermessungen von Solarluftkollektoren

Das Parabolrinnenkraftwerk Andasol 1 dient als Vorbild für das Projekt »DESERTEC«. Es ist Europas erstes solarthermisches Kraftwerk mit Parabolrinnentechnologie, in dem das Sonnenlicht mit Spiegeln auf ein Receiverrohr fokussiert. Durch die Sonnenenergie wird ein synthetisches Wärmeträger-Öl erhitzt, der entstehende Dampf treibt eine Kraftwerksturbine an. Andasol 1 produziert bei rund 3800 Volllaststunden eine elektrische Leistung von 50 Megawatt. Das Fraunhofer ISE unterstützt die Entwicklung von solarthermischen Komponenten, z. B. Receivern und Konzentratorspiegeln, und untersucht systemtechnische Fragestellungen wie die optimale Integration in den Dampfkreislauf.

ANSPRECHPARTNER

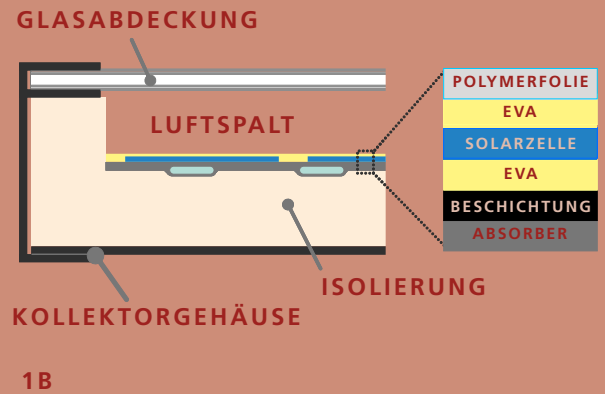
Thermische Solaranlagen	Dipl.-Phys. Gerhard Stryi-Hipp	Telefon +49 761 4588-5686 gerhard.stryi-hipp@ise.fraunhofer.de
--------------------------------	--------------------------------	---

Energieeffiziente und solare Kühlung	Dr. Peter Schossig	Telefon +49 761 4588-5130 peter.schossig@ise.fraunhofer.de
---	--------------------	---

Solare Prozesswärme	Dr. Werner Platzer	Telefon +49 761 4588-5983 werner.platzer@ise.fraunhofer.de
----------------------------	--------------------	---

Solarthermische Kraftwerke	Dr. Werner Platzer	Telefon +49 761 4588-5983 werner.platzer@ise.fraunhofer.de
-----------------------------------	--------------------	---

Wärme- und Kältespeicher	Dr. Peter Schossig	Telefon +49 761 4588-5130 peter.schossig@ise.fraunhofer.de
---------------------------------	--------------------	---



OPTIMIERTER PHOTOVOLTAISCH-THERMISCHER HYBRIDKOLLEKTOR

Photovoltaisch-thermische (PVT) Hybridkollektoren sind prinzipiell die effizienteste Art Solarenergie zu nutzen. In der Praxis konnten sie sich allerdings aufgrund eines unbefriedigenden elektrischen und thermischen Wirkungsgrads bislang nicht durchsetzen. Mit einem neuen Aufbau des PVT-Kollektors konnten nun deutliche Wirkungsgradverbesserungen erzielt und damit nachgewiesen werden, dass PVT-Kollektoren bei einem angepassten Aufbau Vorteile gegenüber klassischen Kollektoren und PV-Modulen aufweisen.

Patrick Dupeyrat, Michael Hermann, **Gerhard Stryi-Hipp**, Harry Wirth, Werner Platzer

PVT-Flachkollektoren bestehen typischerweise aus einem PV-Modul, das mit einem flüssigkeitsdurchströmten Absorber verklebt und in ein Kollektorgehäuse eingebaut wird. Dabei sind der Stromertrag durch die zusätzliche Glasscheibe sowie die höheren Zelltemperaturen und der Solarwärmeertrag durch den schlechten Wärmeübergang von der Zelle zur Wärmeträgerflüssigkeit sowie den vergrößerten Wärmeverlust durch die fehlende selektive Beschichtung reduziert. Ein Zielkonflikt besteht darin, dass die Solarzelle aufgrund des Temperaturkoeffizienten bei eher niedrigeren Temperaturen betrieben werden sollte, ein befriedigender solarthermischer Ertrag jedoch höhere Arbeitstemperaturen erfordert.

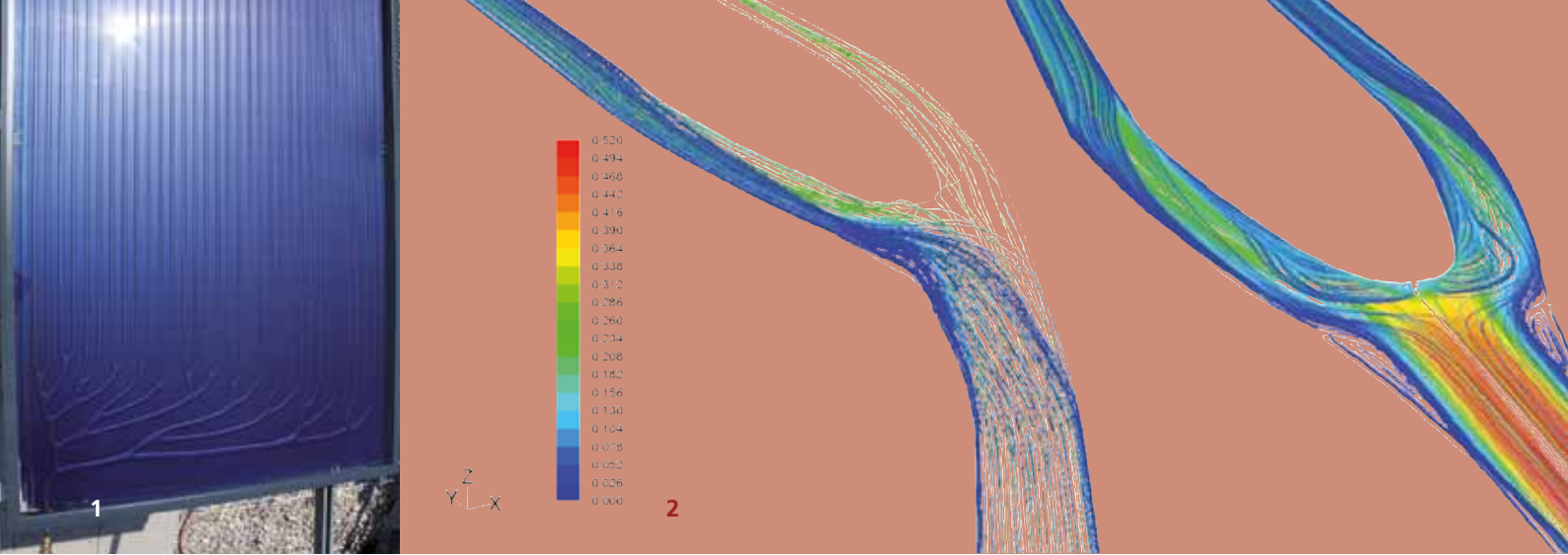
Im Rahmen des Projekts »PVTcol« haben wir im Auftrag der Électricité de France (EDF) einen deutlich optimierten PVT-Kollektor entwickelt, der dank verändertem Aufbau und neuem Fertigungsverfahren eine deutlich höhere Effizienz als Standard-PVT-Kollektoren aufweist. In diesem optimierten PVT-Kollektor wurde ein einseitig ebener Aluminium-Rollbondabsorber mit FracTherm®-Kanalstruktur mit gleichmäßiger Durchströmung eingesetzt. Auf der ebenen Seite des Rollbondabsorbers wurden kristalline Solarzellen auflaminiert.

1A/B Prototyp (A) und schematischer Aufbau (B) des optimierten PVT-Kollektors.

Eine EVA-Folie verbindet Solarzellen und Absorberblech und dient auch zur elektrischen Isolierung. Durch die Direktlamination konnte die Wärmeleitung von der Solarzelle zum Wärmeträgermedium wesentlich verbessert werden. Der Einsatz einer dünnen Polymerfolie mit niedrigem Brechungsindex als Abdeckung der Solarzellen führte zu einer deutlichen Erhöhung der Transmission gegenüber Glas und EVA-Folie. Da sich der Modulabsorberverbund im Kollektorgehäuse befindet, bietet die Folie einen ausreichenden Schutz für die Solarzellen. Als transparente Abdeckung des Kollektors wurde eine beidseitig antireflexbeschichtete Glasscheibe verwendet.

Durch den spezifischen Aufbau konnten wir zwei wesentliche Nachteile bisheriger PVT-Konstruktionen beseitigen: die reduzierte optische Effizienz und die verminderte Wärmeleitung. Dementsprechend wurden sowohl der elektrische als auch der thermische Wirkungsgrad des optimierten PVT-Kollektors gegenüber einem Standard-PVT-Kollektor deutlich gesteigert.

In einem Folgeprojekt soll der Wärmeertrag auch bei höheren Arbeitstemperaturen verbessert und damit der thermische Wirkungsgrad weiter gesteigert werden. Dabei sind auch neue Konzepte geplant, die eine Zerstörung des PV-Laminats aufgrund höherer Stillstandstemperaturen verhindern. Gelingt dies bei akzeptablen Kosten, wird der PVT-Kollektor eine sehr attraktive Alternative zu einfachen PV- und Solarthermie-Kollektoren werden.



SOLARKOLLEKTOREN MIT BIONISCHEM FRACTHERM®-ABSORBER

Seit mehreren Jahren beschäftigen wir uns mit der Entwicklung von Solarabsorbern, deren Strömungskanäle ähnlich natürlichen Strukturen in Blättern oder Blutgefäßsystemen mehrfach verzweigt sind und einen geringen Druckverlust sowie eine gleichmäßige Durchströmung ermöglichen. Im Rahmen des EU-Projekts »BIONICOL« haben wir erste Prototypen marktüblicher Größe erfolgreich entworfen und vermessen.

Maximilian Bauch, Wolfgang Graf, **Michael Hermann**, Philipp Hofmann, Hans-Martin Keyl, Lotta Koch, Karin Lunz, Christoph Thoma, Werner Platzer

Die Energieeffizienz von Solarabsorbern hängt sowohl von der Wärmeübertragung von der Absorberoberfläche in das Wärmeträgermedium als auch vom Druckverlust ab, der von der Pumpe überwunden werden muss. Im Rahmen früherer Untersuchungen konnte bereits in kleinem Maßstab gezeigt werden, dass der von uns entwickelte bionische FracTherm®-Ansatz bei hoher thermischer Effizienz zu einem geringeren Druckverlust bzw. einer gleichmäßigeren Durchströmung führen kann als konventionelle Mäander- oder Harfenabsorber. Im Rahmen des EU-Projekts »BIONICOL« wird diese Technologie nun erstmals auf Kollektoren marktüblicher Größe angewandt. Als Fertigungsverfahren wird das so genannte Rollbonding eingesetzt, als Material wird Aluminium verwendet. Mit Industriepartnern aus drei Ländern haben wir ein Kanaldesign entworfen, das den Randbedingungen der Rollbondfertigung genügt.

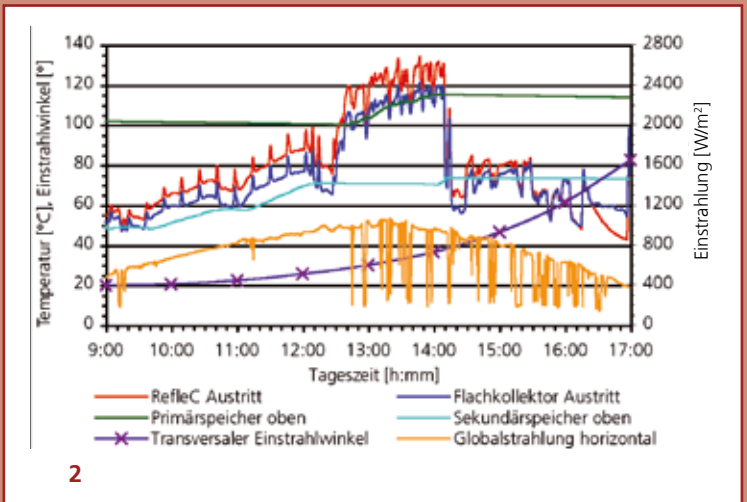
Nach Fertigung der Solarabsorber und geeigneter Vorbehandlung der Oberfläche wurde eine spektralselektive Beschichtung auf Basis eines CrO_x -Cermets in unserer Sputteranlage aufgebracht. Die beschichteten Solarabsorber wurden in Kollektorgehäuse eingebaut, deren Konstruktion jener von Serienprodukten entspricht. Einen so hergestellten

- 1 Prototyp eines Solarkollektors marktüblicher Größe (Aperturfläche: $1,9 \text{ m}^2$) mit bionischem FracTherm®-Solarabsorber.
- 2 Stromlinien als Resultat von CFD-Simulationen (Computational Fluid Dynamics) zur Untersuchung von Strömungsphänomenen in FracTherm®-Verzweigungen. Es treten komplexe, dreidimensionale Effekte wie Sekundärströmungen (DEAN'sche Wirbelpaare) auf.

Kollektor (Abb. 1) haben wir in unserem Solarsimulator unter Normbedingungen vermessen. Der Kollektorwirkungsgradfaktor F' wurde zu 0,96 ermittelt. Ein sehr guter Wert, wenn man bedenkt, dass fast im gesamten Absorber eine laminare Strömung vorliegt. Die Rollbond-Technologie ermöglicht generell sehr hohe thermische Effizienzen. Ein wesentlicher Unterschied des FracTherm®-Absorbers liegt aber darin, dass ein deutlich geringerer Druckverlust als in Rollbondabsorbern mit anderen Kanalstrukturen gemessen wurde.

Im Rahmen des Projekts »BIONICOL« führen wir auch Simulationen und Experimente durch, um die Strömungsvorgänge in FracTherm®-Verzweigungen besser zu verstehen und in Zukunft Optimierungen vornehmen zu können (Abb. 2). Dazu nutzen wir dreidimensionale Simulationen mittels Computational Fluid Dynamics (CFD), eindimensionale Strömungsberechnungen sowie Messungen und Visualisierungen an einem neu entwickelten Fluidodynamikteststand. Die Simulationsergebnisse zeigten im Gegensatz zu konventionellen T- oder Y-Verzweigungen keinen plötzlichen Druckabfall im Bereich der Verzweigung. Diese Erkenntnis auf theoretischer Seite bestätigt somit sehr gut die Ergebnisse der Druckverlustmessungen von FracTherm®-Absorbern.

Industriepartner im Projekt »BIONICOL« sind die Firmen TiSUN GmbH, CGA Technologies SpA, INTERPANE Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft mbH und TYFOROP Chemie GmbH. Das Projekt wird von der Europäischen Kommission gefördert.



SOLARE PROZESSWÄRME – KOLLEKTOR-ENTWICKLUNG UND ANLAGENMONITORING

Die solare Erzeugung industrieller Prozesswärme gewinnt zunehmend an Bedeutung. 23 % des industriellen Wärmebedarfs in Deutschland kann bei Temperaturen unter 100 °C bereitgestellt werden, weitere 10 % unter 150 °C. In den vergangenen drei Jahren haben wir die Firma Wagner & Co. Solartechnik bei der Entwicklung des RefleC-Kollektors unterstützt, der auf Arbeitstemperaturen zwischen 80 °C und 150 °C optimiert wurde. Im Juni 2010 wurde eine Pilotanlage installiert.

Stefan Heß, Michael Klemke, Paolo Di Lauro, Axel Oliva, Werner Platzer

Der RefleC-Kollektor ist ein zweifach abgedeckter Flachkollektor (Antireflex-Solarglas und Kunststoffolie), an dessen Unterkante ein segmentierter stationärer Reflektor anschließt, der zusätzliche Solarstrahlung auf den Kollektor lenkt. Die Reflektorgeometrie und den Basiskollektor haben wir durch Strahlverfolgungs- und Ertragsimulationen optimiert. Hierbei wurde besonderes Augenmerk auf die Nutzung der in unseren Breiten wesentlichen Diffusstrahlung und deren Einfluss auf den Jahresenergieertrag des Kollektors gelegt. Zur Validierung haben wir in unserem TestLab Solar Thermal Systems umfangreiche Messungen an vier Testmustern durchgeführt. Neben der Bestimmung von Einstrahlwinkelkorrekturfaktor (IAM), Wirkungsgradkennlinie und Diffusstrahlungsakzeptanz wurden auch Funktionsprüfungen durchgeführt.

Die Pilotanlage der Wäscherei Laguna in Marburg (Lahn) besitzt eine Aperturfläche von 57 m². Der Primärspeicher und die zwei nachgeschalteten, parallelen Sekundärspeicher haben je 1 m³ Volumen. Der Solarkreis wird aufgrund der hohen Betriebstemperaturen von bis zu 130 °C mit einem Druck von 6 bar betrieben. Die Speicher sind als Druckspeicher ausgeführt und können bis 120 °C (primär) bzw. 110 °C (sekundär) beladen werden. Die Anlage unterstützt zwei Niedertempe-

- 1 RefleC-Kollektorrinne (Pilotanlage): Die Unterkonstruktion der Reflektoren stützt die davor liegende Kollektorreihe ohne Reflektoren, die als Referenz dient.
- 2 Analyse der Speicherbeladung des RefleC- im Vergleich zum Flachkollektor (Mittwoch, 14.7.2010). Die Reflektoren wirken bei Einstrahlwinkeln von ca. 25° optimal, ab ca. 45° sind sie nicht mehr aktiv.

ratur- und einen Hochtemperaturverbraucher der Wäscherei. Auf Prozessebene wird ein Schütt Speicher mit Warmwasser für die Waschmaschinen von 20 °C auf bis zu 80 °C erwärmt. Die Wäscherei wird über ein teilweise offenes Dampfnetz versorgt, das an zwei Einbindungsstellen solar unterstützt wird. Der Kondensatrücklauf beträgt nur ca. 50 %, weil ein erheblicher Teil des Dampfes direkt verwendet wird. Deshalb kann das notwendige Kesselzusatzwasser von 20 °C auf bis zu 90 °C solar vorgewärmt werden. Um die Leistungsfähigkeit der Kollektoren und des Systems bei hohen Temperaturen zu demonstrieren, wird im Sommer zusätzlich das Kesselspeisewasser von 90 °C auf max. 120 °C vorgewärmt.

Im Monitoring vergleichen wir das Verhalten des RefleC-Kollektors im Betrieb mit dem des Basiskollektors (doppelt abgedeckter Flachkollektor ohne Reflektoren). So können wir die stark vom Einfallswinkel der Strahlung abhängige Leistung des Kollektors genauer analysieren und Empfehlungen für die optimierte Regelung des Kollektor- und des Beladekreises sowie für die Stagnationsvermeidung geben. Außerdem untersuchen wir die Einbindung der Solarwärme in die drei zu unterstützenden Prozesse. Auf Basis unserer Messdaten konnten die Massenströme der Teilfelder und die Regelungsparameter an das Verhalten des neuen Kollektors angepasst werden.

Die Arbeiten werden im Rahmen des Programms »Solarthermie2000plus« vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.



SOLARTHERMISCHE MEERWASSERENTSALZUNG

Die Bereitstellung von Trinkwasser durch die Entsalzung von Meerwasser ist aus einigen Teilen der Welt heute nicht mehr wegzudenken. Der Einsatz von Solarenergie ist hierzu aufgrund spezifischer geographischer Gegebenheiten hervorragend geeignet. Am Fraunhofer ISE entwickeln wir thermisch getriebene Membrandestillationsanlagen, die zur Aufbereitung von Salzwasser zu Trinkwasser, aber auch in industriellen Trennprozessen eingesetzt werden können. Der Antrieb erfolgt solarthermisch oder mittels Abwärme.

Florian Groß, Mario Hillebrand, **Joachim Koschikowski**, Martin Rolletschek, Daniel Pfeiffle, Rebecca Schwantes, Marcel Wieghaus*, Daniel Winter, Hans-Martin Henning

* PSE AG

Die Membrandestillation (MD) ist ein thermisches Trennverfahren, bei dem eine Verdampfung aus einer Sole heraus durch eine Membran hindurch stattfindet. Die flüssige Sole wird dabei von der Membran zurückgehalten. Als treibende Kraft muss eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Seiten der Membran aufgebaut werden. Am Fraunhofer ISE entwickeln wir MD-Module, die über eine integrierte Wärmerückgewinnung verfügen und damit besonders energieeffizient sind. Diese Module integrieren wir z. B. in solar betriebene Entsalzungsanlagen.

Im Juli 2010 haben wir eine solarthermisch betriebene Brackwasserentsalzungsanlage in einem Dorf im Norden Namibias aufgebaut. Die im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekts »CuveWaters« installierte Anlage wird von einem Kollektorfeld mit einer Größe von 225 m² mit Wärme versorgt und ist für eine maximale Tageskapazität von 5 m³ ausgelegt. Die Entsalzungsanlage einschließlich des 12 m³ Wärmespeichers

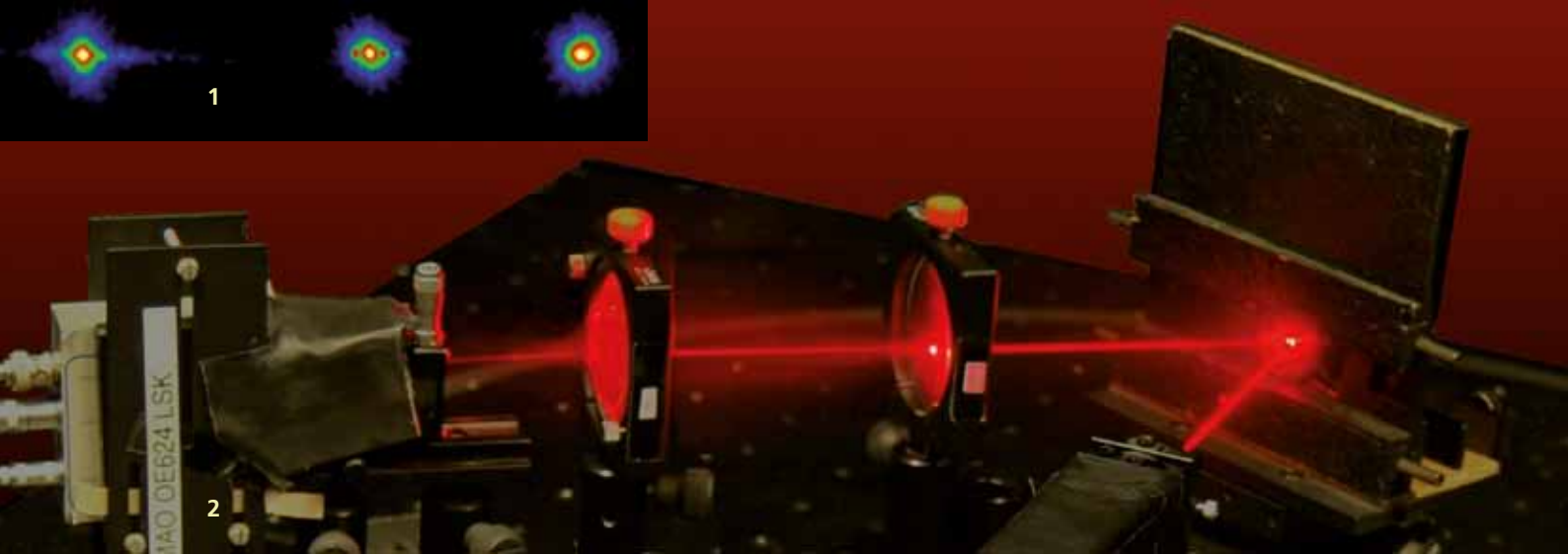
1 Solarbetriebene Membrandestillationsanlage zur Entsalzung von stark salzhaltigem Brackwasser im Norden Namibias. Das System ist komplett in einen 20 ft Seecontainer integriert. Im Vordergrund befinden sich das Membranausdehnungsgefäß, der Kühlturm und der Speisewasservorlagebehälter. Die extremen Umgebungstemperaturen von weniger als 0 °C im Winter und mehr als 50 °C im Sommer stellen eine besondere Herausforderung an die Technik dar.

2 Abwärmebetriebene Membrandestillationsanlage zur Meerwasserentsalzung auf der italienischen Mittelmeerinsel Pantelleria. Die Anlage produziert Reinstwasser mit einer elektrischen Leitfähigkeit kleiner 5 µS.

ist in einen 20 ft Container eingebaut. Die elektrischen Komponenten der Anlage werden mit PV versorgt, wodurch ein vollkommen energieautarker Betrieb möglich ist.

Im Rahmen eines von der EU geförderten Projekts haben wir in einem internationalen Konsortium ein weiteres Membrandestillationssystem entwickelt. Dieses System hat ebenfalls eine Tageskapazität von 5 m³, wird aber mit der Abwärme eines Dieselmotors in einem Kraftwerk auf einer kleinen Insel südlich von Sizilien betrieben. Durch die Nutzung von Abwärme kann die Anlage über 24 h am Tag im optimalen Betriebspunkt betrieben werden und unterliegt keinen tageszeitlichen und saisonalen Schwankungen.

Wir haben beide Systeme mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet, um eine intensive Betriebsanalyse vornehmen zu können. Außerdem installierten wir im Rahmen des EU-Projekts zwei kleinere solar betriebene Membrandestillationssysteme mit einer maximalen Tageskapazität von 150 l in Tunesien.



CHARAKTERISIERUNG NEUER SPIEGELMATERIALIEN FÜR PARABOLRINNENKOLLEKTOREN

Optische Eigenschaften von Reflektormaterialien beeinflussen maßgeblich die Effizienz von konzentrierenden Kollektoren für solarthermische Kraftwerke und Prozesswärme. Deswegen haben wir eine Reihe von Verfahren und Modellen zur detaillierten optischen Charakterisierung von neuen Reflektormaterialien entwickelt. Wir untersuchen z. B. das Reflexionsverhalten von Aluminium- oder Folienspiegelsystemen und ermitteln durch Verknüpfung mit optischer Simulation (Strahlverfolgung) den Einfluss der Strahlaufweitung auf den Energieertrag eines Kollektors.

Anna Heimsath, Gregor Kutscheidt, Peter Nitz, Werner Platzer

Bei konzentrierenden Solarkollektoren soll die direkte Solarstrahlung möglichst vollständig über die Spiegel auf das Absorberrohr reflektiert werden. Sowohl für die Auswahl der Kernkomponente Spiegel als auch für die Simulation des Energieertrags der Kollektoren ist die Kenntnis der optischen Reflexionseigenschaften für alle relevanten Einfallswinkel unerlässlich. Das gilt besonders für Spiegel auf Aluminium- oder Polymerfolienbasis. Sie weisen eine besondere anisotrope Streucharakteristik auf (Abb. 1) und werden mit Standardmethoden und -modellen bisher oft unzureichend charakterisiert.

Wir messen in unserem Labor relevante optische Eigenschaften wie die winkelabhängige gerichtete Reflektivität, die Strahlaufweitung durch die Reflektoroberfläche oder die Formtreue von Spiegeln, die u. a. in Parabolrinnen montiert werden. Insbesondere bei neuen Spiegelmaterialien aus Mehrschichtsystemen bestimmen wir den winkelabhängigen direkten solaren Reflexionsgrad für Einfallswinkel bis 60° , da hier Interferenzeffekte stärkere Auswirkungen haben können. Die resultierende Funktion kann dann direkt in die Ertragsanalyse eines Kollektorsystems übernommen werden.

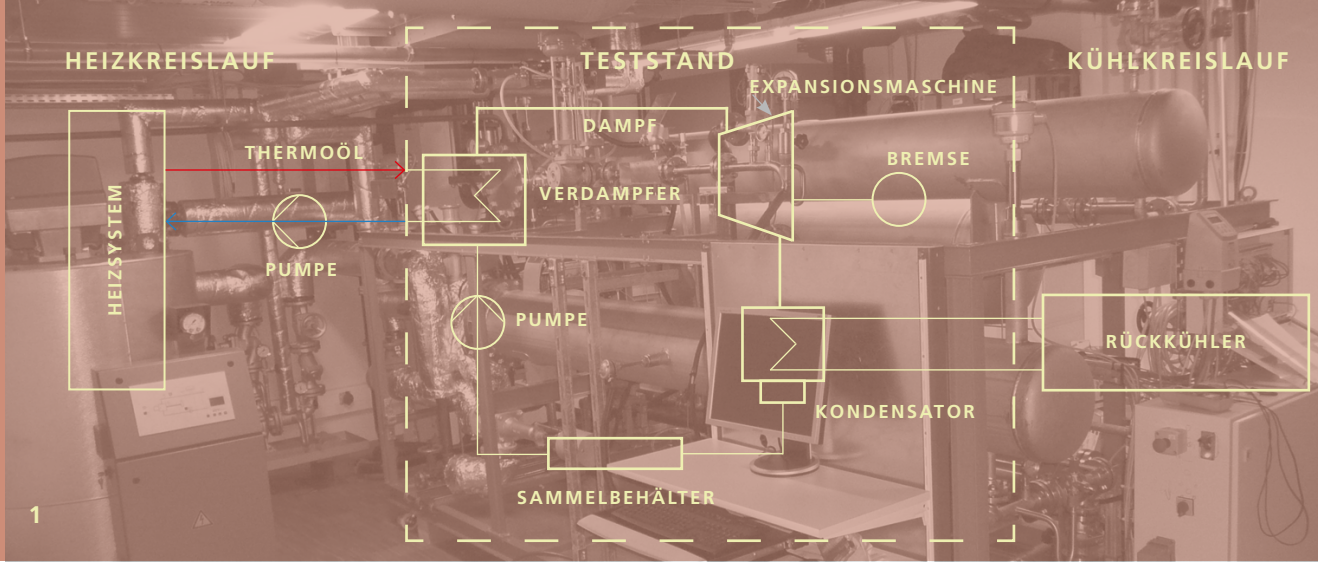
1 Reflexionsprofil eines aluminiumbasierten Reflektors (links), eines Rückseiten-Glasspiegels (Mitte) sowie eines Reflektors auf Polymerbasis (rechts).

2 Lasergoniometer zur detaillierten Charakterisierung des winkelaufgelösten Reflexionsprofils von Spiegelmaterialien (Bildmontage des Laserstrahls).

Um Aufschluss über das charakteristische Streuprofil eines Reflektors zu bekommen, nutzen wir unsere Laser- und Weißlicht-Goniophotometer (Abb. 2). Hiermit messen wir winkelaufgelöst das Profil eines reflektierten Lichtstrahls in Schritten von typischerweise $0,1^\circ$ und ermitteln aus den Daten die Parameter einer Modellfunktion, die das Streuverhalten der Oberfläche beschreibt. Aluminiumbasierte Reflektoren modellieren wir z. B. durch zwei Gauß'sche Verteilungen und eine Exponentialfunktion. Walzspuren auf dem Reflektorblech sind die Ursache für eine anisotrope Streuverteilung, die wir in der optischen Simulation berücksichtigen müssen, um realistische Ergebnisse zu bekommen.

Die dreidimensionale Krümmung und Formtreue eines Spiegels bestimmen wir mit der Streifenreflexionstechnik (Deflektometrie). Dabei nimmt eine Kamera die Verzerrung eines dynamischen sinusoidalen Musters im Spiegel auf. Die Verzerrung wird analysiert und daraus die lokale Oberfläche des Spiegels über die gesamte Spiegelfläche bzw. den Bildausschnitt der Kamera ermittelt. Durch die hohe Sensitivität der Methode ist es möglich, kleinste Abweichungen der Oberflächenwinkel im Bereich von kleiner 1 mrad zu erfassen und so Herstellungsfehler und Defekte zu detektieren.

Die methodischen Ergebnisse unserer Arbeit fließen in die Normungsaktivitäten der IEA Solarpaces Task 3 ein. Das Projekt wird von Industriepartnern unterstützt.



LABOR FÜR SOLARTHERMISCHE POLYGENERATION IN BETRIEB

Die Bereitstellung von Strom, Wärme und/oder Kälte aus einem konzentrierenden Kollektor könnte in Zukunft in sonnenreichen Ländern fossile Brennstoffe in Industriebetrieben ersetzen. Nachdem eine Studie (MEDIFRES) die Wirtschaftlichkeit solcher Systeme gezeigt hat, wurde am Fraunhofer ISE ein Labor für deren Weiterentwicklung geschaffen. Das neue »Polygeneration Labor« eröffnet die Möglichkeit, Komponenten für die solarthermische Anwendung zu testen und Controller für das Gesamtsystem zu entwickeln.

Max Klein, **Anton Neuhäuser**, Peter Nitz, Daniel Willert, Werner Platzer

Bisher realisierte solarthermische Kraftwerke liegen im Leistungsbereich oberhalb 10 MW_{el}. Anlagen mit kleinerer Leistung sind mit höheren spezifischen Kosten verbunden, hätten aber Vorteile hinsichtlich der Finanzierung und einer schnelleren technischen Entwicklung durch eine Vielzahl von Anlagen. Höhere spezifische Kosten können durch eine kombinierte Nutzung der Kollektoren zur Stromerzeugung, Prozesswärme- und/oder Kältebereitstellung sowie zur Meerwasserentsalzung und der damit verbundenen Effizienzsteigerung kompensiert werden. Damit könnten kleinere und mittlere Anlagen im Leistungsbereich 50 kW_{el} bis 10 MW_{el} eine wirtschaftliche Option zur CO₂-Reduzierung und zur Unabhängigkeit von steigenden Rohstoffpreisen sein. Besonders interessant werden solche Systeme, wenn Strom aus Dieselgeneratoren ersetzt werden kann. Diese werden dort eingesetzt, wo das Netz nicht vorhanden ist oder nicht zuverlässig funktioniert. So werden z. B. in Indien 30 % des industriellen Stromverbrauchs über firmeneigene Stromerzeuger bereitgestellt.

Um die Schlüsselkomponenten (Speicher, Expansionsmaschine, Kältemaschine) einer solaren Polygenerationsanlage testen und weiterentwickeln zu können, haben wir eine Laboranlage

1 Schematische Darstellung des Heiz-, Dampf- und Kühlkreislaufs in der Testanlage. Im Hintergrund das 2010 fertig gestellte Labor für solarthermische Polygeneration am Fraunhofer ISE.

aufgebaut. Hauptzweck des Labors ist es, die Anlagenteile für den Einsatz unter dem schwankenden Wärmeeintrag eines konzentrierenden Kollektors zu qualifizieren und weiterzuentwickeln. Gerade das Teillastverhalten und das transiente Verhalten von Komponenten sind oft nicht ausreichend bekannt. Weiterhin können Regelregime für Einzelkomponenten sowie für das Gesamtsystem getestet und optimiert werden, um eine sichere und wirkungsgradoptimale Versorgung der Verbraucher zu gewährleisten. Ein Gasbrenner ermöglicht dabei einen von der solaren Einstrahlung in Freiburg unabhängigen Betrieb, der das Verhalten eines beliebigen Kollektorfelds an verschiedenen Standorten nachbilden kann.

Der Teststand am Fraunhofer ISE ist so ausgelegt, dass sowohl Wasser als auch organische Arbeitsmedien genutzt werden können. Wir können also sowohl klassische Dampfprozesse als auch Organic Rankine Cycles (ORC) für die Stromerzeugung untersuchen. Der Gasbrenner kann mit einer thermischen Leistung von bis zu 250 kW einen Thermoölkreis bis auf 300 °C erhitzen. Das heiße Thermoöl kann dann wahlweise einem thermischen Speicher oder dem Verdampfer zugeführt werden. Dabei werden Verdampfungsdrücke von bis zu 30 bar erreicht. Mit Hilfe einer Wasserbremse können Expansionsmaschinen mit Leistungen von bis zu 40 kW_{el} flexibel bei verschiedenen Drehzahlen in Voll- und Teillast untersucht werden. Abgerundet wird unser Dienstleistungsangebot durch Simulationsrechnungen und Studien, die veranschaulichen wie sich ein ermitteltes Anfahr- oder Teillastverhalten in einem Gesamtsystem zur solarthermischen Polygeneration auswirkt.

STROM AUS SONNENLICHT



SILICIUM-PHOTOVOLTAIK

Die Photovoltaik erlebt seit mehreren Jahren einen Boom, gefördert durch gezielte Markteinführungsprogramme in Deutschland, Italien und anderen europäischen Ländern. Die weltweit installierte Leistung ist bereits auf über 25 GW angewachsen.

Mehr als 80 Prozent der hergestellten nominalen Solarzellenleistung basiert auf kristallinem Silicium. Wirkungsgrad, Preis-/Leistungsverhältnis, Langzeitstabilität und belastbare Kostenreduktionspotenziale sprechen dafür, dass dieser Leistungsträger der terrestrischen Photovoltaik auch künftig marktbeherrschend sein wird. Unsere FuE-Angebote zielen darauf ab, die Kostendegression weiter voranzutreiben. So bilden wir die gesamte Wertschöpfungskette der kristallinen Silicium-Photovoltaik ab:

Im Silicium Material Technologie und Evaluationscenter SIMTEC beschäftigen wir uns mit der Epitaxie von Siliciumschichten, der Analyse verschiedenartiger, teils neuer Silicium-Feedstock-Materialien sowie mit Material- und Prozessfragen der dafür eingesetzten Technologien. Wir verfügen über eine Kristallisationsanlage, die es uns erlaubt, von 15 kg bis zu 250 kg schwere multikristalline Blöcke herzustellen. Auch die Säge- und Schleiftechnologie ist vorhanden, so dass wir aus den kristallisierten Blöcken Säulen und Wafer anfertigen können. Der wissenschaftliche Schwerpunkt unserer Arbeiten liegt in der Anpassung der Kristallisationsprozesse an das jeweils spezifische Solarsilicium, u. a. forschen wir intensiv an gereinigtem metallurgischem Silicium (»Upgraded Metallurgical Grade Silicon/umg«).

Eine zentrale Aufgabe unseres ETALab ist die Entwicklung und Analyse von hocheffizienten Solarzellenkonzepten und -prozessen, um so auf dünneren Wafern höhere Wirkungsgrade zu erzielen und damit die Voraussetzung für eine substantielle Kostensenkung in der Silicium-Photovoltaik zu erreichen. Bei den Solarzellenkonzepten liegt unser Fokus dabei auf rückseitig kontaktierten Zellen und Strukturen für n-Typ Silicium. Das

ETALab umfasst eine ausgezeichnete Prozessinfrastruktur im 500 m² großen Reinraumlabor, die es uns erlaubt, mehrere internationale Rekordwirkungsgrade zu erreichen. ETA steht für Effizienz, Technologie und Analyse. Zusätzlich stehen uns ca. 900 m² Einzellaborflächen zur Verfügung, um effektive Oberflächenpassivierungsschichten, neuartige Metallisierungs- und Dotierverfahren, innovative Nanostrukturierungstechnologien und neue Charakterisierungsmethoden zu entwickeln.

Bei der kristallinen Silicium-Dünnschichtsolarzelle forschen wir am Konzept des Waferäquivalents. Dabei wird aus siliciumhaltigem Gas eine hochwertige Dünnschicht auf kostengünstigen Substraten abgeschieden. Das Resultat sieht aus wie ein Wafer und lässt sich sehr ähnlich einer konventionellen Wafer-Solarzelle verarbeiten. Durch den geringen Einsatz an hochreinem Silicium kann sich das Waferäquivalent-Konzept von der Versorgungslage für Solarsilicium abkoppeln und erlaubt daher ein sehr dynamisches Marktwachstum.

In unserem Photovoltaik Technologie Evaluationscenter PV-TEC können wir nach einer Erweiterung auf über 1200 m² Technologiefläche im Pilotmaßstab, d. h. mit einem Durchsatz von mehr als 100 Wafern pro Stunde, sowohl Solarzellen mit den industriell üblichen siebgedruckten Kontakten als auch mit hochwertiger Oberflächenpassivierung und neuartiger Verschaltungsarchitektur herstellen. Für die verschiedenen Technologiebereiche stehen uns sowohl flexible halbautomatische als auch hochproduktive vollautomatische Anlagen für die Prozessentwicklung zur Verfügung. Ergänzt wird dieser Technologiepark durch Inline- und Offlinemesstechnik. Alle Material- und Prozessdaten werden in einem zentralen Datenbanksystem erfasst und sichern so unsere hohen Qualitätsanforderungen ab, die sich auch insbesondere 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 dabei maßgeblich an der Entwicklung neuer Charakterisierungsverfahren, z. B. der bildgebenden Photolumineszenzmethode zur Analyse von Siliciummaterial und Zellen, beteiligt.

Das Photovoltaik Modul-Technologiecenter MTC am Fraunhofer ISE ermöglicht schließlich die Verarbeitung neuer Zellen und Materialien in aussagekräftigen Stückzahlen und Formaten. Prozessschritte und Anlagentechnik für die Modulproduktion werden bis zur Vorstufe einer Serienfertigung entwickelt. Kernstücke des Technikums sind ein flexibel einsetzbarer Tabber-Stringer und ein Laminator, ergänzt durch eine Reihe von Mess- und Prüfsystemen.

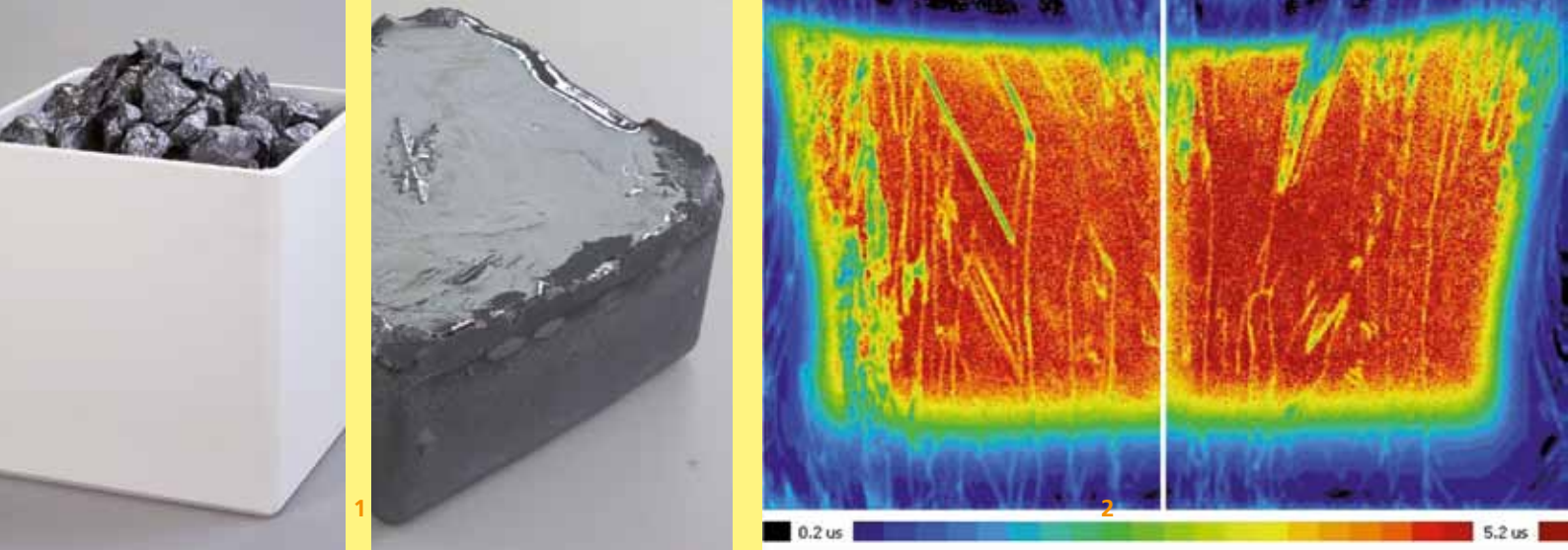
Solarzellen müssen zum Schutz vor Umwelteinflüssen langzeitstabil gekapselt werden, ein Bereich, in dem deutliche Qualitätserhöhungs- und Kostensenkungspotenziale vorhanden sind. Wir arbeiten an neuen Modulkonzepten und Materialkombinationen, auch für dünnere, größere sowie nur rückseitig kontaktierte Solarzellen. Schlüsselrollen in unserem Beitrag zur Qualitätserhöhung nehmen das vertiefte Verständnis von Alterungsmechanismen und die Verfahren zu deren Nachweis ein.

Unsere Aktivitäten im Bereich Siliciumsolarzellen am Standort Freiburg werden ergänzt durch das Labor- und Servicecenter LSC Gelsenkirchen (s. Beitrag S. 74), das gemeinsam mit dem Fraunhofer IISB betriebene Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM in Freiberg, Sachsen, sowie das Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP in Halle, das gemeinsam mit dem Fraunhofer IWM betrieben wird (s. Beitrag S. 58).

Eine interessante Variante neuartiger Solarzellenkonzepte stellen rückseitenkontaktierte Solarzellen dar. Hierbei erfolgt die gesamte Metallisierung auf der Rückseite, so dass die dem Licht zugewandte Fläche frei von Verschattung ist und komplett für die Umwandlung der einfallenden Solarstrahlung in elektrische Energie zur Verfügung steht. Mit dem im Bild zu sehenden hocheffizienten Laserbohrprozess erzeugen wir mehrere 1000 so genannte Vias pro Sekunde. Durch diese wird der an der Vorderseite gesammelte Strom durch hochdotierte Siliciumbereiche zur Rückseite geführt. Für solche Emitter-Wrap-Through (EWT)-Solarzellen konnten wir mit einem industrienahen Prozess am Fraunhofer ISE einen Wirkungsgrad von 18,8 Prozent erzielen.

ANSPRECHPARTNER

Feedstock, Kristallisation und Wafering	Dr. Stephan Riepe	Telefon +49 761 4588-5636 stephan.riepe@ise.fraunhofer.de
Kristalline Silicium-Dünnschichtsolarzellen	Dr. Stefan Reber	Telefon +49 761 4588-5248 stefan.reber@ise.fraunhofer.de
Industrielle und neuartige Solarzellenstrukturen	Dr. Stefan Glunz Dr. Ralf Preu	Telefon +49 761 4588-5191 stefan.glunz@ise.fraunhofer.de Telefon +49 761 4588-5260 ralf.preu@ise.fraunhofer.de
Produktionsanlagen und Prozessentwicklung	Dr. Ralf Preu Dr. Stefan Glunz	Telefon +49 761 4588-5260 ralf.preu@ise.fraunhofer.de Telefon +49 761 4588-5191 stefan.glunz@ise.fraunhofer.de
Charakterisierung, Qualitätssicherung und Messtechnikentwicklung: Material, Zellen und Module	Dr. Wilhelm Warta	Telefon +49 761 4588-5192 wilhelm.warta@ise.fraunhofer.de
Modultechnologie und -analyse	Dr. Harry Wirth	Telefon +49 761 4588-5858 harry.wirth@ise.fraunhofer.de



KRISTALLISATIONSENTWICKLUNG FÜR MULTIKRISTALLINES SILICIUM

Die Kristallisationsentwicklung für multikristallines Blocksilicium am Silicium Material Technologie und Evaluationscenter SIMTEC zielt auf höhere Materialqualität und Ausbeute ab. Dazu forschen wir an neuen Tiegelsystemen für die gerichtete Erstarrung mit hochreinen Beschichtungen und angepasster Gasspülung. Blockbearbeitung und Wafering sowie Messsysteme für die Block- und Waferanalyse ermöglichen eine umfassende Probenherstellung und Charakterisierung im SIMTEC.

Fridolin Haas, Philipp Häuber, Teresa Orellana, **Stephan Riepe**, Claudia Schmid, Mark Schumann, Matthias Singh, Bernd Weber, Yaniss Wencel, Andreas Bett

Die Weiterentwicklung von multikristallinem Silicium für hocheffiziente Solarzellen ist ein Schwerpunkt der Kristallisationsarbeiten im SIMTEC-Labor. Dazu stellen wir in einer industrienahen Vertical Gradient Freeze (VGF) Anlage multikristalline Testblöcke in den Forschungsgrößen G1 entsprechend 12–15 kg sowie G2 entsprechend 75–80 kg Si-Material her. An kleinen G1-Blöcken studieren wir Aspekte der Materialqualität wie die Ausbildung der Kristallstruktur oder den Eintrag von Verunreinigungen. Dabei können wir aus einem Block bis zu 300 Wafer in Standardgeometrie für die Herstellung von Solarzellen und Teststrukturen sowie Proben für die Analyse von Verunreinigungselementen gewinnen. Dies nutzen wir aktuell zur Analyse verschiedener Si-Materialien (z. B. umg-Silicium) und zur Evaluation neuartiger Tiegelbeschichtungen.

Bei der Blockgröße G2 stehen prozesstechnische Aspekte wie die Untersuchung der Temperaturfelder in verschiedenen Prozessschritten und die Optimierung der Gasatmosphäre im Mittelpunkt. Die experimentellen Arbeiten unterstützen wir mit Simulationen der Temperaturverteilungen und Gasflüsse mit Hilfe eines kommerziellen Computational Fluid Dynamics

1 Quarztiegel mit Ausgangsmaterial vor der Kristallisation (links) und multikristalliner Block (rechts) in der Forschungsgröße G1, entsprechend 15 kg Silicium.

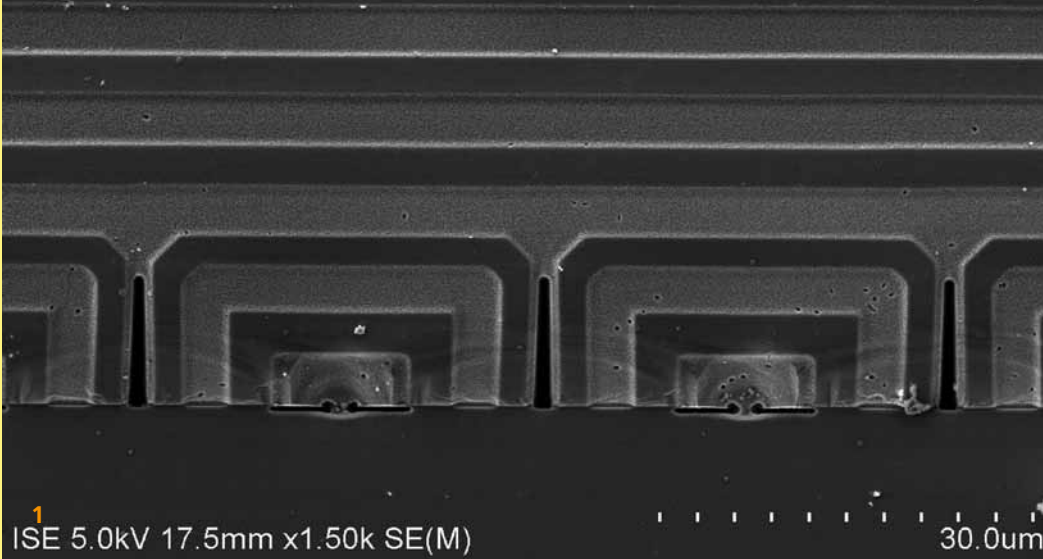
2 Lebensdauertopographie (MW-PCD) am Querschnitt eines G2-Blocks. Deutlich erkennbar ist die Reduktion der Lebensdauer am Rand durch den Eintrag von Verunreinigungen aus dem Tiegel.

(CFD) Programms. Die bis zu 2200 Wafer pro G2-Block ermöglichen vielfältige Analysen sowie Entwicklungen im Solarzellenprozess mit statistischer Analyse.

Für beide Blockgrößen haben wir Standards mit einer Kristallqualität vergleichbar zu aktuellem Industriematerial etabliert. Durch Optimierung von Ofenkonstruktion und Gasspülung konnten wir eine substantielle Verbesserung beim Eintrag von Kohlenstoff sowie eine Reduktion von Siliciumcarbid-Einschlüssen erzielen. Die Untersuchungen des Verhaltens von Beschichtungen während der Schmelz- und Erstarrungsphasen werden sowohl in der VGF-Anlage als auch in einem experimentellen Spiegelofen durchgeführt. Die Experimente sollen dazu beitragen, Anhaftungen des Siliciums am Tiegel zu verhindern und den Eintrag von Verunreinigungen in die Schmelze zu verringern.

Für die Weiterbearbeitung der Blöcke ist vor Ort eine vollständige Sägestrecke inklusive Reinigungsbank in Betrieb, mit der wir für unsere Forschungsprojekte und externe Kunden Säulen, Wafer und spezielle Probengeometrien flexibel herstellen. Dabei nutzen wir für die Waferreinigung einen industriellen Prozess, der einen hohen Durchsatz und gute Oberflächenreinheit sicherstellt.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des Fraunhofer-Eigenforschungsprojekts »Silicon-Beacon« unterstützt.



AUF DEM WEG ZU HOCHEFFIZIENTEN EPITAKTISCHEN WAFERÄQUIVALENTEN

Epitaktische Waferäquivalente sind das einfachste Konzept, um die Vorteile von Si-Wafersolarzellen mit denen von Dünnschichtsolarzellen zu verbinden: niedrige Herstellkosten bei hoher Effizienz. Auf dem Weg dorthin setzen wir aktuell einen Schwerpunkt auf das Lichtmanagement in der Zelle, um mehr Strom aus geringerer Schichtdicke ernten zu können.

Marion Drießen, Elke Gust, Mira Kwiatkowska, Harald Lautenschlager, **Stefan Reber**, Philipp Rosenits, Andreas Bett

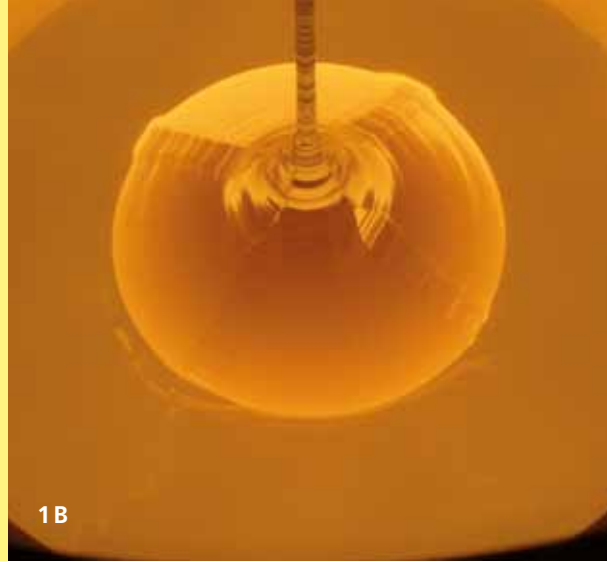
Bei den so genannten Epitaktischen Waferäquivalenten, deren photovoltaisch aktive Schicht aus nur ca. 20 µm dünnem kristallinem Silicium besteht, verliert man ohne effizientes Lichtmanagement bis zu 20 % der eingestrahlenen Energie zusätzlich zu den unvermeidbaren Verlusten. Dieses ungenutzte Wirkungsgradpotenzial wollen wir mit einem einfachen Lösungsansatz heben: Das Licht wird schräg in die Schicht eingekoppelt und trifft an der Rückseite der Schicht auf einen effizienten Spiegel mit mehr als 90 % Reflektivität. Während ersteres durch Aufrauhen der Schichtvorderseite mit geeigneten Ätzmethoden relativ einfach ist, stellt sich die zweite Anforderung deutlich schwieriger dar. Neben der Spiegelwirkung muss die Reflektionsschicht auch die Kristallstruktur des Substrats weitergeben, sonst kann man die erforderliche elektronische Qualität der Si-Schicht nicht erreichen.

Der von uns verfolgte Lösungsweg ist das so genannte »Epitaktische Laterale Überwachsen« (ELO), das aus der Mikroelektronik bekannt ist. Dabei werden dielektrische Spiegelschichten mit kleinen Öffnungen zur Si-Unterlage versehen, in denen die abzuscheidende Si-Schicht nukleiert und sich defektarm über der Spiegelschicht schließt. Unsere Hauptaufgabe ist, diesen bisher für Solarzellen zu teuren Prozess mit kostengünstigen Anlagen und Techniken zu realisieren.

1 *ELO-Schicht auf monokristallinem Substrat mit SiO₂-Reflektor. Durch gezielte Variation der Dotierung konnte der Wachstumsfortschritt sichtbar gemacht werden.*

Unsere Untersuchungen zeigen vielversprechende Ergebnisse. So konnten wir nachweisen, dass in kostengünstigen, speziell für die PV aufgebauten Abscheidereaktoren auch bei sehr hohen Abscheideraten qualitativ hochwertige Si-Schichten auf einlagigen SiO₂-Spiegeln hergestellt werden können. Das für diesen Zweck verwendete monokristalline Substrat wird bei optimal ausgerichteten Öffnungen kristallographisch sehr gut übertragen. Andere Kristallrichtungen, z. B. bei multikristallinen Substraten, lassen sich ebenso zuverlässig überwachen. Hier arbeiten wir derzeit daran, die von uns beobachteten erhöhten Defektdichten zu ausreichend niedrigen Werten zu bringen. Sehr erfreulich sind unsere Messungen zur Reflektion in den entsprechenden Proben: Wie in der Simulation für vollständig geschlossene SiO₂-Spiegel vorhergesagt, bildet sich in den ELO-Schichten eine stark erhöhte Reflektivität im interessanten langwelligen Bereich aus. Selbst bei relativ geringen Überdeckungsgraden des SiO₂-Spiegels von 90 % folgt der Messwert noch sehr gut der theoretischen Kurve, was den Raum für Prozessvereinfachungen weiter öffnet. Kostengünstig kann der ELO-Prozess werden, wenn wir die notwendigen Öffnungen durch gezielte Manipulation der chemischen Zusammensetzung der Spiegelschicht und durch geeignete Temperaturschritte zufällig entstehen lassen. Erste ELO-Versuche mit diesen Spiegeln haben die prinzipielle Machbarkeit des Überwachens gezeigt. Nahezu perfekte optische Eigenschaften erreicht man durch Multilagenspiegel. Erste Exemplare auf Basis von Si-Carbid, Si-Nitrid und Al-Oxid wurden bereits hergestellt und für ELO getestet.

Die Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), sowie durch die Fraunhofer-Zukunftsstiftung gefördert.



LABOR FÜR KRISTALLISATIONSTECHNOLOGIE AM FRAUNHOFER CSP IN HALLE

Das Fraunhofer-Center für Silizium Photovoltaik CSP in Halle wurde gemeinsam vom Fraunhofer ISE und Fraunhofer IWM gegründet und wird von beiden Instituten gemeinsam geführt. Im Labor für Kristallisationstechnologie LKT des Fraunhofer CSP stehen modernste Maschinen für die Kristallisation von Silicium für die Photovoltaik zur Verfügung. In industriellen Anlagen stellen wir monokristalline Ingots nach dem Czochralski-Verfahren und multikristalline Blöcke nach dem Vertical Gradient Freeze-Verfahren her. Darüber hinaus arbeiten wir an der Etablierung der Float Zone-Technik für die Herstellung von Solarwafern. Die Anlagen wurden für Forschungsarbeiten erfolgreich in Betrieb genommen.

Rainer Barth, Stefan Köstner, Joachim Prause, Stephan Riepe, Heiko Wust, **Andreas Bett**

Die Arbeitsgebiete des Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP untergliedern sich in die zwei Bereiche »Zuverlässigkeit und Technologien für Netzparität« (CSP-ZTN) und »Labor für Kristallisationstechnologie« (CSP-LKT), die eng interagieren. Das CSP-LKT forscht, derzeit unter kommissarischer Leitung von Dr. Andreas Bett, an der Weiterentwicklung von Kristallisationstechnologien für die Photovoltaik.

Im CSP-LKT arbeiten wir an den drei wichtigsten Kristallisationstechnologien für die Züchtung von Siliciumkristallen für die Photovoltaik. Im Fokus stehen dabei das Czochralski-Verfahren (Cz) und das Float Zone-Verfahren (FZ) zur Herstellung von monokristallinen Ingots.

Zur Weiterentwicklung des Cz-Verfahrens steht uns eine moderne Industrieanlage (EKZ 2700) der Firma PVA Tepla zur Verfügung. Nach Inbetriebnahme in 2010 konnten wir in Zusammenarbeit mit PVA einen Standardprozess etablieren, mit dem wir Cz-Ingots mit ca. 60 kg Gewicht bei ca. 205 mm Durchmesser und einer Länge von ca. 60 cm herstellen können. Erste Analysen des Materials zeigen für einen Dotierbereich nahe am Industriestandard sehr gute Materialqualität. So haben die Kristalle eine nach einem Standardverfahren abgeschätzte Volumenlebensdauer größer 300 μ s bei guter Homogenität über die Ingotslänge (Abb. 2). Der Schwerpunkt der Forschungsarbeiten in der Cz-Kristallisation lag auf der Untersuchung der Schmelztiegel und des Tiegeleinflusses bei längeren Prozesszeiten sowie einer Optimierung der Prozessführung insbesondere im Abkühlverhalten.

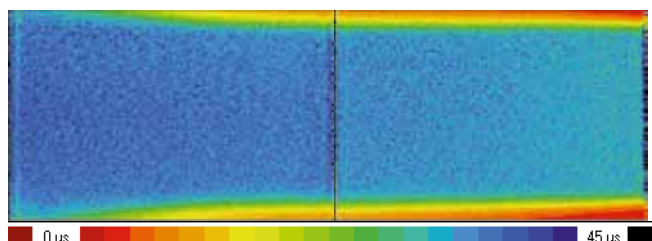
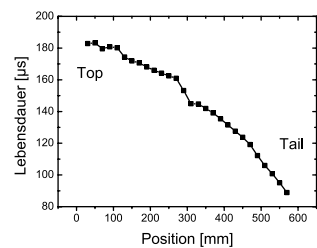
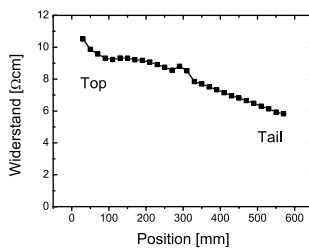


Kristallzüchtung nach dem Float Zone-Verfahren ergibt Einkristalle mit höchster Materialqualität, auf denen die besten Wirkungsgrade von Solarzellen erzielt werden. Auf Grund der aktuell hohen Herstellungskosten hat das Material jedoch keinen signifikanten Anteil am PV-Markt. Die Forschungsarbeiten am CSP-LKT zielen auf eine Reduzierung der spezifischen Herstellungskosten für FZ-Material ab. Dazu verfolgen wir mit verschiedenen Industriepartnern Ansätze, die eine weitergehende Automatisierung des Prozesses ermöglichen. Darüber hinaus untersuchen wir neuartige Feedstockmaterialien, die speziell für den Einsatz in der Photovoltaik bei externen Partnern entwickelt werden. Für die Experimente stellen wir in einer Laboranlage (Modell Fz14) Testkristalle mit 3" Durchmesser und einer variablen Länge her. Erste Analysen zeigen eine gute Materialqualität mit Ladungsträgerlebensdauern von bis zu 8 ms.

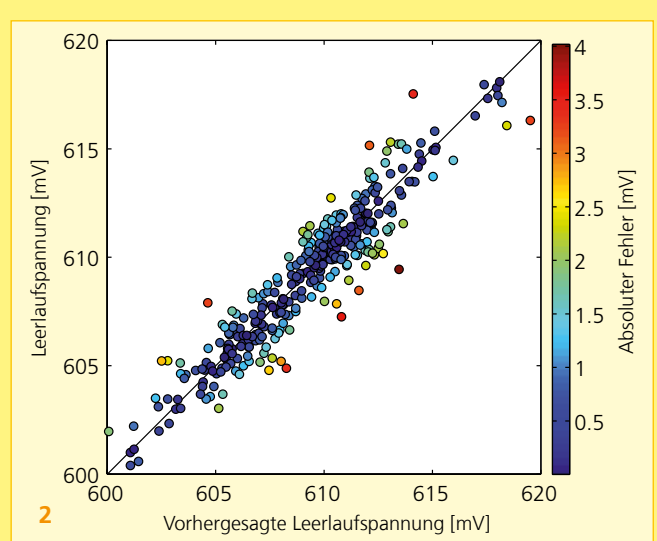
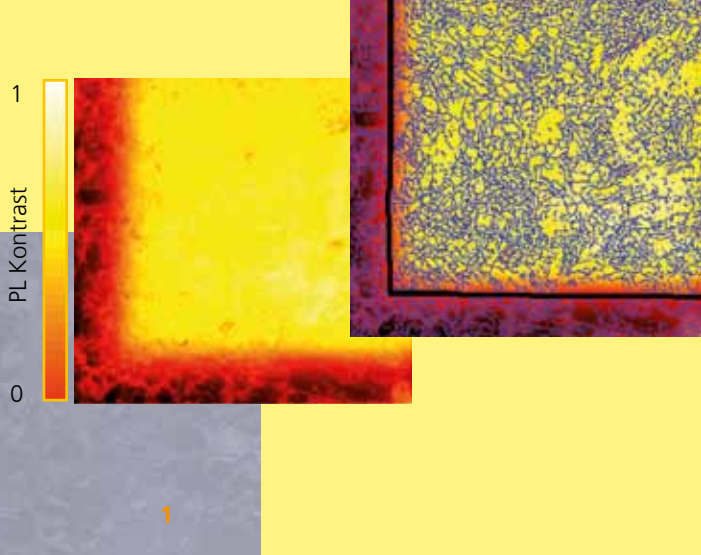
Als dritte Technologie entwickeln wir den Kristallisationsprozess nach dem Vertical Gradient Freeze (VGF) Verfahren weiter. Dazu steht eine industrielle Anlage der Firma PVA Tepla (Multicrystallizer) zur Verfügung, mit der multikristalline Blöcke bis zu 450 kg hergestellt werden. Hier stehen Fragestellungen zur Prozessoptimierung und zur Reduktion des Kohlenstoffeintrags in den Kristall im Mittelpunkt. Die Arbeiten erfolgen in enger Abstimmung mit den Forschungsarbeiten am VGF-Verfahren am Fraunhofer ISE. Die Weiterbearbeitung und Analyse aller hergestellten Kristalle erfolgt in Zusammenarbeit mit dem CSP-ZTN und dem Fraunhofer ISE.

Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Projekte »Cz-Sil« und »Fz-Sil« des Spitzenclusters »Solarvalley Mitteldeutschland« unterstützt.

- 1 Herstellung von einkristallinem Silicium nach dem Czochralski-Verfahren (Cz) mit Abbildungen des gefüllten Tiegels (A), der Ankeimphase (B) und des fertigen Kristalls (C).
- 2 Herstellung von einkristallinem Silicium nach dem Float Zone-Verfahren (FZ): Schmelzzone (A) und fertiger 3" Kristall (B).



- 3 Elektrische Analyse eines Cz-Ingots von 600 mm Länge und 205 mm Durchmesser mit Messungen zum Widerstand (links oben), der Lebensdauer (rechts oben) und der lokalen Verteilung der effektiven Lebensdauer (unten).



QUALITÄTBEWERTUNG VON MULTIKRISTALLINEN SILICIUMWAFERN

Die Methode des Photolumineszenz-Imaging (PLI) ist vielversprechend für eine frühzeitige Bewertung der Materialqualität von multikristallinen Silicium-Wafern (mc-Si), da verschiedene Kristalldefekte mit hoher Ortsauflösung sichtbar gemacht werden können. Um die Methode inline einsetzbar zu machen, wurden am Fraunhofer ISE robuste Algorithmen zur automatischen Detektion und Quantifizierung überlagernder Defektstrukturen in den PL-Aufnahmen entwickelt. Mit Mustererkennungsverfahren konnten wir hieraus die Materialqualität quantitativ ermitteln und die Qualität von Solarzellen anhand der PLI-Messungen im as-cut Stadium vorhersagen.

Matthias Demant*, Markus Glatthaar, Jonas Haunschild*, Stefan Rein, Ralf Zeidler, Ralf Preu

* Freiburger Materialforschungszentrum FMF, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

1 *Digitalaufnahme (links) und PL-Aufnahme (Mitte) eines unbehandelten mc-Si Wafers. Die PL-Aufnahme zeigt typische Kristallisationsdefekte, die im Detektionsergebnis (rechts) verdeutlicht werden. Die dunklen Regionen am Rand der PL-Aufnahme weisen auf Verunreinigungen durch den Kristallisationstiegel hin, die durch ein adaptives Schwellwertverfahren erkannt werden (schwarze Linie). Defekte der Kristallstruktur erscheinen als Linienstrukturen. Diese können trotz starker Kontrastschwankungen innerhalb der PL-Aufnahme zuverlässig detektiert werden, sichtbar an den blauen Linien im Detektionsergebnis.*

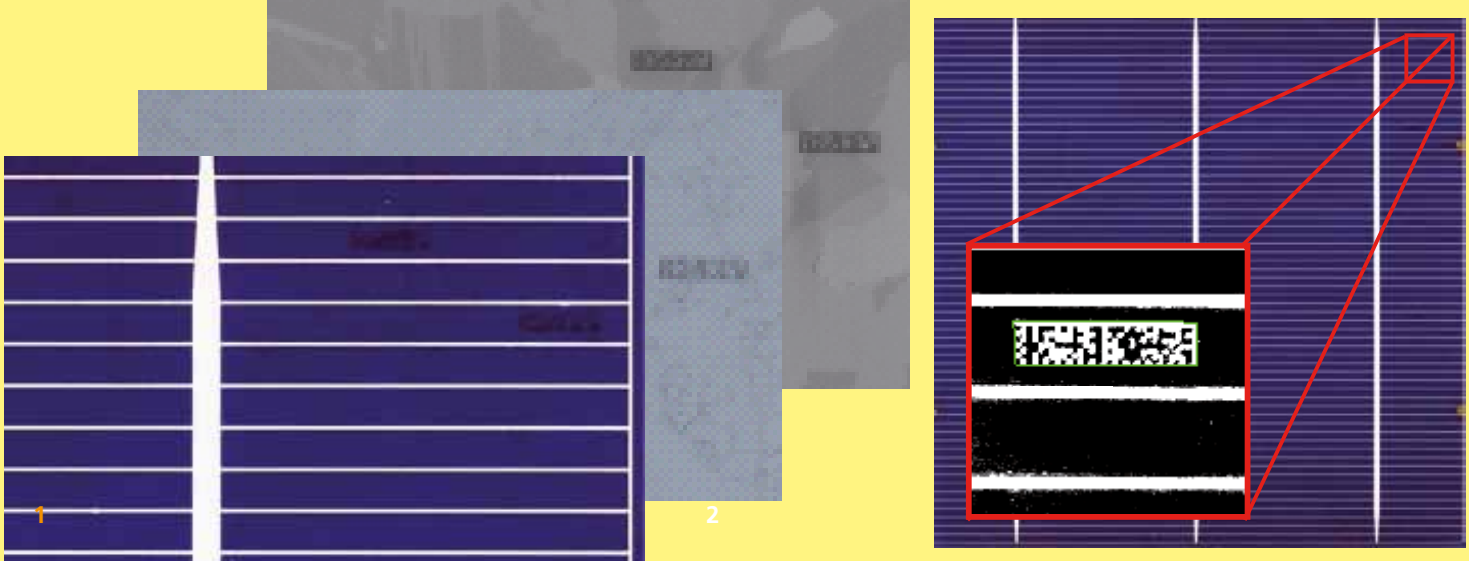
2 *Aus den PL-Aufnahmen der unbehandelten Wafer wurden physikalisch relevante Merkmale extrahiert und ein Modell zur Vorhersage der Leerlaufspannung erstellt. Die Abbildung zeigt die hohe Korrelation zwischen der vorhergesagten und der gemessenen Leerlaufspannung anhand von 365 industriell gefertigten Solarzellen mit stark variierenden Materialeigenschaften.*

Der Wirkungsgrad von mc-Si Solarzellen hängt in hohem Maß von der elektrischen Materialqualität der eingesetzten Wafer ab. Diese wird durch Kristalldefekte und Verunreinigungen bestimmt, die während der Kristallisation eingebaut werden. Viele dieser Defektstrukturen sind in PL-Aufnahmen bereits am as-cut Wafer sichtbar und stehen damit prinzipiell als Qualitätsmerkmal zur Verfügung (Abb. 1). Um diese Merkmale für eine inline taugliche Materialkontrolle nutzen zu können, haben wir Verfahren zur automatischen Detektion und Bewertung der Qualitätsmerkmale entwickelt.

Bei der automatisierten Analyse von PL-Aufnahmen stellt die Überlagerung verschiedenartiger Defektstrukturen eine besondere Herausforderung dar. Zudem treten bei der Betrachtung von großen Materialvariationen starke Schwankungen bei Aufnahmeintensität und Kontrast auf. Die entwickelten Algorithmen zeichnen sich durch eine robuste und exakte Detektion der Defektstrukturen aus, wobei eine hohe Trennschärfe gewährleistet ist. Neben dem Flächenanteil der Kristalldefekte werden defektreiche und kontaminierte Regionen sowie Inhomogenitäten des PL-Signals zuverlässig quantifiziert.

Die Bedeutung dieser physikalisch relevanten Beschreibung der Materialeigenschaften wurde mittels Mustererkennungs-methoden verifiziert. Basierend auf einem neuronalen Netzwerk konnte ein Vorhersagemodell zur Bestimmung der Leerlaufspannung der fertigen Solarzelle anhand der Materialbeschreibung trainiert werden. Die hohe Korrelation zwischen der gemessenen und der am unprozessierten Wafer vorhergesagten Offenkreisspannung in Abb. 2 zeigt, dass die hier entwickelte Beschreibung der Wafer anhand der extrahierten Merkmale ein geeignetes Maß für die Bewertung der elektrischen Materialqualität der Wafer darstellt.

Diese Arbeit wurde im Rahmen eines internen Programms der Fraunhofer-Gesellschaft gefördert.



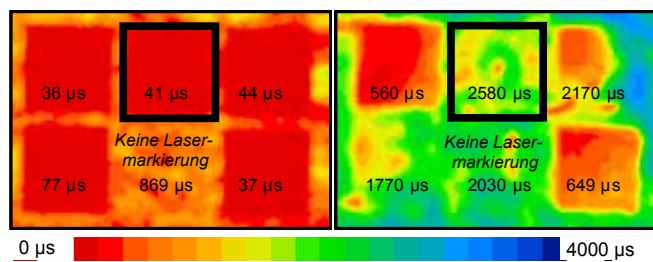
WAFERIDENTIFIKATION MITTELS DATA MATRIX CODES

Eine präzise Prozess- und Qualitätskontrolle, die eine prozessübergreifende Korrelation von Messdaten zulässt, erfordert eine Waferidentifikation durch das Aufbringen und Auslesen eines maschinenlesbaren Codes auf dem Wafer. Eine geeignete Methode zur kostengünstigen Erzeugung solcher robuster Strukturen ist die Lasermarkierung. Da hierbei jedoch der Si-Kristall erheblich geschädigt werden kann, stellt die Entwicklung des Markierungsprozesses und des Lesesystems eine technologische und messtechnische Herausforderung dar.

Christian Harmel, **Alexander Krieg**, **Stefan Rein**, Christian Schmitt, Albrecht Weil, Ralf Preu

Eine robuste Einzelwaferverfolgung in industriellen Fertigungslinien erfordert aufgrund der hohen Durchsätze eine eindeutige Markierung der Wafer, anhand derer die Wafer an jeder Prozessanlage durch ein Erkennungssystem aktiv identifiziert werden können. Wir haben am Fraunhofer ISE ein Verfahren zur Waferidentifikation entwickelt, das auf einem Data Matrix Code basiert, der zu Beginn des Solarzellenherstellungsprozesses mit einem Laser auf den Wafer eingraviert wird und mit einem speziellen Lesegerät ausgelesen wird (Abb. 1). Indem der Code auf der Wafervorderseite platziert wird, lassen sich die Solarzellen auch im Modul identifizieren, was eine Rückverfolgung entlang der gesamten Wertschöpfungskette ermöglicht. Da sich der Code damit in der aktiven Zellfläche befindet, darf er die Leistungsdaten der Solarzelle nicht beeinträchtigen. Wie in den Lebensdauertopographien in Abb. 2 zu sehen, ist die laserinduzierte Kristallschädigung unseres optimierten Laserprozesses so gering, dass sie durch den üblichen Materialabtrag bei der nasschemischen Textur vollständig entfernt wird. Dennoch bleibt die Codestruktur unter dem Ätzprozess erhalten, was Voraussetzung für einen robusten Leseprozess entlang der Prozesskette ist. Da die Reflektivität der Waferoberfläche im Herstellungsprozess durch

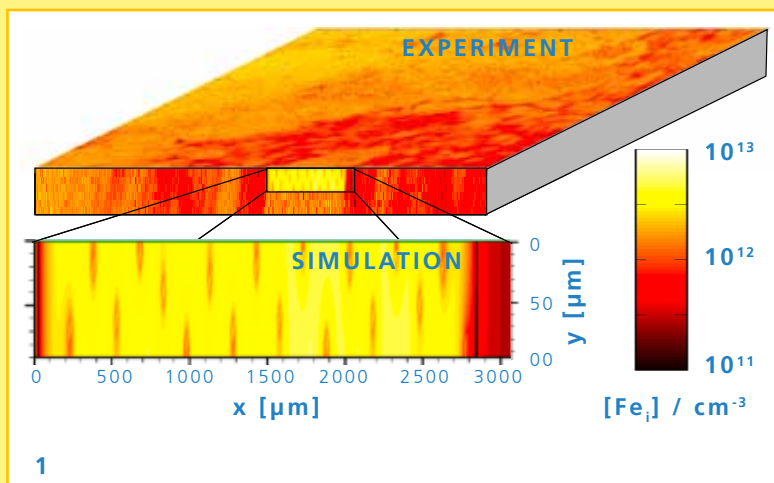
1 Mit Data Matrix Codes markierte Wafer in den Prozessstadien as-cut, nach Textur und auf der fertigen Solarzelle (links). Vergrößerte Aufnahme eines Data Matrix Codes (5,8 mm² Bedeckungsfläche) zwischen den Kontaktfingern einer Solarzelle (rechts).



2 Lebensdauertopographien an oberflächenpassivierten Wafern mit lasermarkierten Teststrukturen nach der Markierung (links) und nach einem Ätzschritt (rechts).

mehrere Ätz- und Beschichtungsschritte systematisch reduziert wird, besteht die wesentliche Herausforderung darin, Codes mit sehr schwachem und inhomogenem Kontrast detektieren zu können. Unsere Lesetests mit einem speziell angepassten Lesegerät der Firma SICK haben gezeigt, dass Data Matrix Codes mit einer Kantenlänge von 1,2 mm x 4,8 mm und einer Elementgröße von bis zu 150 µm zuverlässig gelasert und mit einer Erkennungsrate von 98 % über den gesamten Solarzellenherstellungsprozess ausgelesen werden können. In einigen Einzelschritten werden bereits Erkennungsraten von 100 % erreicht. Aufgrund des bestehenden Verbesserungspotenzials erscheint es möglich, das Verfahren zu einem robusten Trackingsystem auszubauen.

Die Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Projekts »QUASSIM« und durch die SICK AG unterstützt.



SIMULATION DER EISENKONZENTRATION IN SILICIUMSOLARZELLEN

Eisen limitiert als wichtigste Verunreinigung in multikristallinen Solarzellen deren Wirkungsgradpotenzial. Die Eisenkonzentration und der Einbau im Silicium hängen dabei wesentlich vom Zellprozess ab. In Abhängigkeit der Feedstock-Verunreinigung, der Kristallqualität und der genauen Temperaturführung lassen sich jetzt Präzipitatgrößen sowie die totale und interstitielle Eisenkonzentration berechnen und optimieren.

Holger Habenicht, Jonas Schön, **Martin Schubert**, Wilhelm Warta, Stefan Glunz

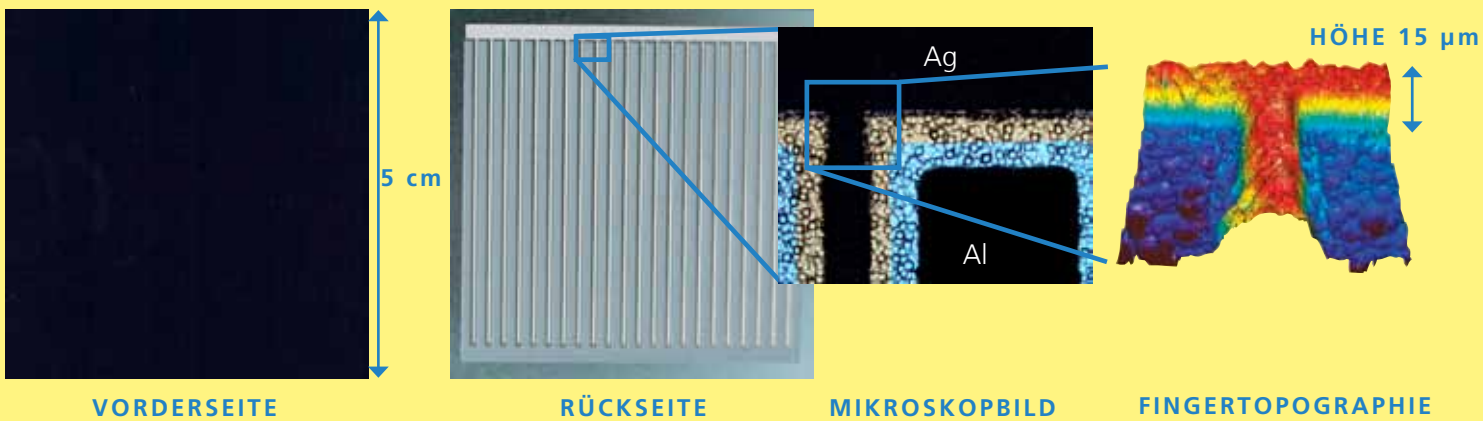
Eisenverunreinigungen können derzeit nicht kosteneffizient vermieden werden, weil sie sowohl im Ausgangsmaterial als auch insbesondere in den Tiegelwänden der Kristallisationsöfen vorkommen. Im Solarzellenprozess lässt sich das Silicium aber noch wesentlich verbessern: Durch Segregation von Eisenatomen in den mit Phosphor dotierten Emitter oder in die rückseitige Aluminiumschicht wird das Material gereinigt, durch Präzipitation im Silicium kann atomar fein verteiltes Eisen auf wenige Stellen konzentriert werden. Diese Effekte sind sehr sensitiv auf die Temperaturführung der Solarzellenprozesse. Um diese zu optimieren ist die Simulation der prozessabhängigen Eisenverteilung von großem Nutzen. Wir haben deshalb auf Basis der Softwareplattform Sentauros Process™ eine Simulation entwickelt, die in der Lage ist, die Eisenkonzentration, -verteilung und -konfiguration in Abhängigkeit der Prozessparameter vorherzusagen. Hierbei wird, ausgehend vom Eisengehalt des Feedstock-Materials und einer möglichen Berücksichtigung von Ausdiffusionsprozessen aus den Wänden des Kristallisationstiegels die Eisenverteilung bestimmt. Ein simulierter Ausschnitt, der den typischen Werten einer für die begleitenden Experimente verwendeten multikristallinen Probe entspricht, ist in Abb. 1 gezeigt. Dabei wird die typische heterogene Verteilung der Keimstellen berücksichtigt. Zur Überprüfung der Simulationsergebnisse

1 Vergleich zwischen experimentell bestimmter (perspektivische Probenoberfläche) und durch Simulation berechneter interstitieller Eisendichte nach Kristallisation.

werden aus PLI-Messungen gewonnene interstitielle Eisendichten mit den simulierten verglichen. Ein Beispiel für eine hohe totale Eisenkonzentration von 10^{16} cm^{-3} in Abb. 1 demonstriert die Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation.

In gleicher Weise lässt sich der im Solarzellenprozess folgende Phosphordiffusionsschritt simulieren, der die interstitielle Eisenkonzentration stark senkt. Dabei werden nur die Phosphorkonzentration des Dotiergases (POCl_3) und die genauen Temperaturbedingungen zur Simulation benötigt. Das Phosphorglas-Wachstum und die Emitterausbildung ergeben sich aus der Simulation. So können die Einflüsse von Temperatur-Halterampen auf die Eisenpräzipitation und von vorausgehenden Temperaturschritten zur Auflösung von Präzipitaten vor der Phosphordiffusion evaluiert werden, um optimale Bedingungen für internes und externes Gettern zu bestimmen. Schließlich wird der letzte Hochtemperaturschritt im Solarzellprozess berücksichtigt: das Feuern der elektrischen Kontakte. Hierbei konkurrieren Auflösungsprozesse von Eisenpräzipitaten mit Gettereffekten durch Segregation in den phosphorhaltigen Emitter und die Aluminiumrückseite. Für Si-Wafer mit gegebener Versetzungsdichte und bekannter Verunreinigung des Feedstock-Materials lässt sich nun ein wichtiger Faktor zur Wirkungsgradlimitierung, die Eisenverteilung, in der Solarzelle abschätzen und über Prozessoptimierung reduzieren.

Die Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Rahmen des Fraunhofer-Eigenforschungsprojekts »Silicon-Beacon« unterstützt.



1

HOCHEFFIZIENTE SIEBGEDRUCKTE N-TYP RÜCKSEITENKONTAKTSOLARZELLEN

Eines der günstigsten und in der PV-Industrie am weitesten verbreiteten Strukturierungsverfahren ist der Siebdruck. Vielversprechend ist die Verwendung von n-Typ Si-Material, da dieses sehr gut für die Herstellung von rückseitig kontaktierten und rückseitig sammelnden Solarzellen mit hohem Wirkungsgradpotenzial geeignet ist. Interessanterweise kann bei n-Typ Solarzellen der benötigte p-Typ Emitter durch Einlegierung von Aluminium erfolgen, so dass Emitter und Metallisierung gleichzeitig hergestellt werden können. Dieser Weg wird in den hier vorgestellten Arbeiten verfolgt. Zu diesem Zweck werden Aluminiumpasten mittels Siebdruck auf den Wafer lokal aufgebracht. So können hocheffiziente Rückseitenkontaktsolarzellen mit robusten industriellen Siebdruckverfahren hergestellt werden. Wir haben bislang Wirkungsgrade von bis zu 20,0 % erreicht.

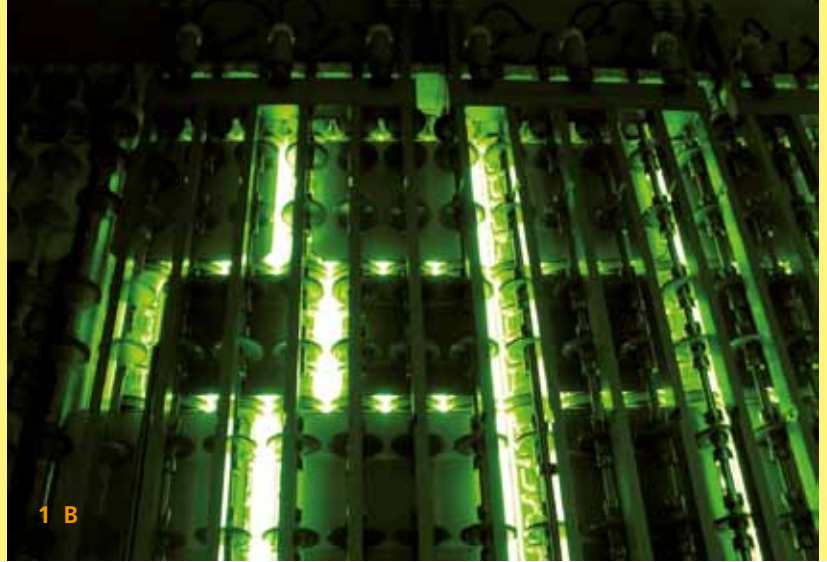
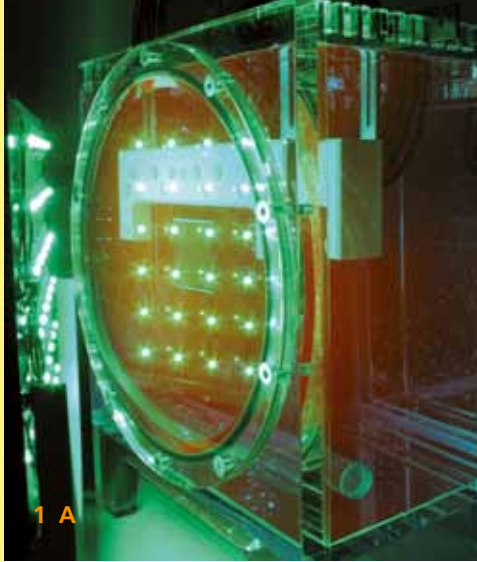
Daniel Biro, Roman Keding, Jonas Krause, Karola Rühle, Robert Woehl, Ralf Preu

1 Die Vorderseite der hergestellten Solarzelle (links) ist auf maximale Lichteinkopplung optimiert und ganzflächig passiviert. Die Rückseite einer hocheffizienten BC-BJ Solarzelle mit siebgedruckten Kontakten (Kantenlänge 5 cm x 5 cm) weist eine ineinandergreifende Fingerstruktur auf. Die hellen Bereiche entsprechen den Silberkontakten und die dunkleren Bereiche dem Aluminium, das zugleich als Emitterdotierung, MetallHalbleiter-Kontakt und Leiterbahn fungiert. Der Zwischenbereich ist passiviert. Ganz rechts wird eine Topographie-Messung mittels Konfokal-Mikroskopie gezeigt, womit die Metallhöhe der Finger gemessen werden kann.

Bei rückseitig kontaktierten und sammelnden Solarzellen (Back-Contact Back-Junction BC-BJ) sind beide Polaritäten der Solarzelle auf der Rückseite des Si-Wafers angeordnet (Abb. 1). Hierdurch wird die bei Standardsolarzellen übliche Abschattung durch das Metallkontaktgitter vermieden. Auf der Rückseite hingegen ergibt sich eine Herausforderung an die Strukturierung, da die elektrischen Strukturen ineinandergreifen müssen, ohne dass Kurzschlüsse entstehen. In den letzten Jahren haben die Siebdrucktechnik und die damit verbundenen Materialien enorme Fortschritte verzeichnet und bei der Standardsolarzelle zu großen Effizienzgewinnen beigetragen. Auch die verbesserte Maschinengenauigkeit erlaubt es mittlerweile, komplexe Strukturen passgenau zu drucken.

Zu diesem Zweck verwenden wir kommerziell erhältliche Pasten, die eine spätere industrielle Umsetzung erleichtern. Diese Materialien können mittels Siebdruck verarbeitet werden und so Emitterstrukturen auf n-Typ Wafern erzeugen. n-Typ Wafer sind besonders vorteilhaft für BC-BJ Zellen, da sie hohe Ladungsträgerlebensdauern aufweisen, was notwendig ist, um hohe Wirkungsgrade zu erzielen. In dieser Arbeit haben wir untersucht, wie wir mittels Siebdruckverfahren eine präzise Struktur schaffen, um dies dann mit der ebenfalls siebgedruckten Metallisierung zu verbinden.

Mit den entwickelten Verfahren konnten erstmals Solarzellen hergestellt werden, die auf einer Aperturfläche von 3,7 x 4,5 cm² (10 Ωcm, FZ-Si) einen Wirkungsgrad von 20,0 % aufweisen. Erfreulicherweise haben wir bereits Verbesserungspotenzial für eine weitere Steigerung des Wirkungsgrads über 21% identifiziert, wodurch diese vergleichsweise einfache Struktur ausgezeichnete Chancen für eine industrielle Umsetzung aufweist.



KUPFERBASIERTE KONTAKTE FÜR SILICIUMSOLARZELLEN

Ein kontinuierliches Wachstum der PV ist nur durch stetige Kostenreduktion und letztlich durch Netzparität zu erreichen. Zur Steigerung der Effizienz von Solarzellen entwickeln wir am Fraunhofer ISE bereits seit längerem mehrstufige Verfahren zur Metallisierung. In dieser Arbeit wird zusätzlich der Ansatz verfolgt, teures Silber durch günstiges Kupfer zu ersetzen. Durch Nutzung eines geeigneten Barrierematerials entsteht ein schlanker, hochleitfähiger, kostengünstiger und langzeitstabiler Solarzellenkontakt.

Jonas Bartsch, Katharina Bay, Sebastian Binder, Birte-Julia Godejohann, Matthias Hörteis, Mathias Kamp, Andrew Mondon, Stefan Glunz

Die Vorderseitenkontakte von Si-Solarzellen werden derzeit hauptsächlich durch Siebdruck von Silberpasten aufgebracht. Üblicherweise werden dadurch 7–10 % der Zellfläche verschattet, zudem hat das Pastenmaterial einen erheblichen Anteil an den Fertigungskosten. Der hier verfolgte neue Ansatz erweitert das Konzept der zweistufigen Metallisierung aus einer dünnen Saatschicht und einer hochleitfähigen galvanisierten Leitschicht (Verschattung < 6 %). Durch Anpassen vorhandener oder Entwicklung neuer Prozesse werden alternative Kontaktmaterialien eingeführt, die sich als Diffusionsbarriere für Kupfer eignen. Kupfer ist bei nahezu gleicher Leitfähigkeit um etwa den Faktor 100 günstiger als Silber. Seine ungünstigen Diffusions- und Defekteigenschaften in Silicium stellen allerdings eine Herausforderung für die technologische Nutzung zur Metallisierung von Solarzellen dar, insbesondere hinsichtlich der Langzeitstabilität von Solarmodulen, auf die gewöhnlich 25–30 Jahre Leistungsgarantie besteht.

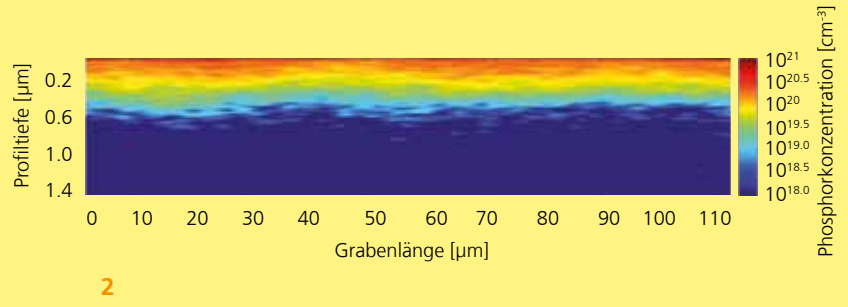
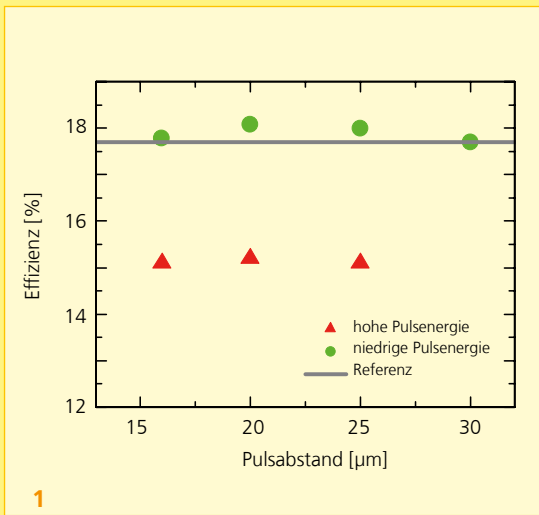
Eine wesentliche Voraussetzung für die Prozessentwicklung ist die Bewertung der Langzeitstabilität. Dazu wurde eigens eine

1 Produktionsanlagen zur lichtinduzierten elektrochemischen Metallabscheidung am Fraunhofer ISE: Vom flexiblen Labortool (A) zur industriellen Inline-Anlage (B).

Methode entwickelt, mit der neue Kontaktsysteme schnell und elegant geprüft werden können.

Zur Bildung von Saat- bzw. Barrierschichten werden Sputterverfahren sowie vorzugsweise kostengünstige elektrochemische Verfahren genutzt. Trotz zusätzlicher Prozessschritte bleiben dadurch die Kosten gering. Die Nutzung von Nickel, auf gedruckten Saatschichten oder als elektrochemisch auf Silicium abgeschiedene Saatschicht, hat dabei sehr erfolgversprechende Resultate gezeigt. Die ermittelte, sich aus möglicher Kupferdiffusion ergebende Limitierung der Modullebensdauer liegt dabei für optimierte Schichtsysteme in der Größenordnung mehrerer hundert Jahre, was die Anforderungen deutlich übertrifft.

In Laborversuchen auf industriellen Cz-Solarzellen im Format 50 x 50 mm² wurde ein grundlegendes Verständnis der Prozesse und des Degradationsverhaltens gewonnen. Dabei wurden bisher Wirkungsgrade von bis zu 18 % erreicht, bei hervorragender Langzeitstabilität. Der weitere Fokus liegt nun auf der Übertragung der optimierten Prozesse zunächst auf ein industrielles Format und anschließend auf industrielle Produktionsmaschinen. Für diese Entwicklungen steht uns seit 2010 eine neue Technologiehalle mit einer Fläche von 450 m² zur Verfügung.



SOLARZELLEN MIT LASER CHEMICAL PROCESSING (LCP) SELEKTIVEN EMITTERN

Ein hochohmiger Emitter kann den Wirkungsgrad einer Solarzelle erhöhen. Dies ermöglicht eine bessere Passivierung und Blauempfindlichkeit sowie eine niedrigere Oberflächenrekombination. Gleichzeitig muss jedoch der Kontaktwiderstand zwischen Metallfinger und Emitter durch einen selektiv hochdotierten Bereich reduziert werden, da ein hochohmiger Emitter mit industriellen Technologien schlecht kontaktiert werden kann. LCP bietet die Möglichkeit, lokal hochdotierte Bereiche zu erzeugen und dabei gleichzeitig vorhandene Passivierungsschichten zu öffnen.

Walter Eipert, Andreas Fell, Christoph Fleischmann, **Filip Granek, Sybille Hopman**, Sven Kluska, Kuno Mayer, Matthias Mesec, Stefan Glunz

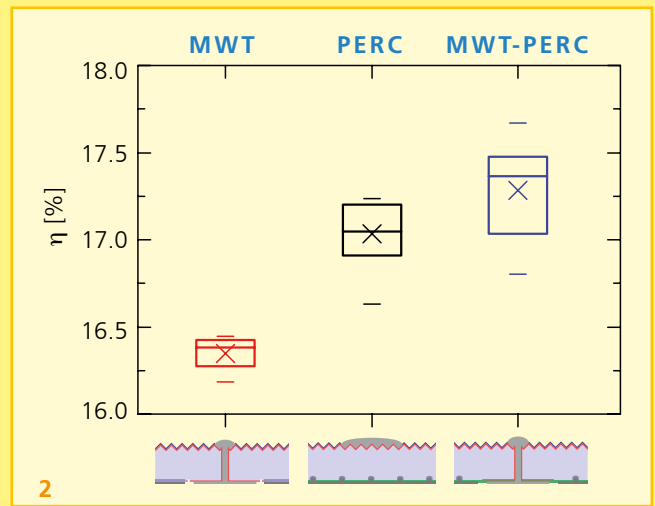
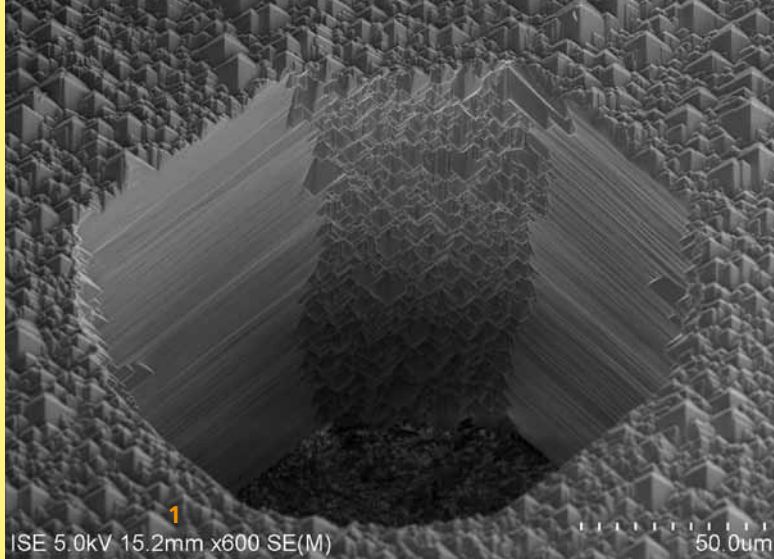
Um eine Wirkungsgradverbesserung durch die Verwendung eines selektiven Emitters zu zeigen, wurden auf einem hochohmigen (80 Ω/sq) und einem niederohmigen (55 Ω/sq) Emitter siebgedruckte Solarzellenstrukturen prozessiert. Unter den Metallfingern wurde mittels LCP der selektive Emitter mit niedriger und hoher Laserpulsenergie erzeugt. Die Referenzen des 55 Ω/sq Emitter ohne LCP-Strukturen zeigen einen erwartungsgemäß höheren Füllfaktor (78,2 %) als die Referenzen des hochohmigeren Emitters (77 %), was auf einen besseren Kontaktwiderstand zurückzuführen ist.

Die Ergebnisse der Solarzelleneffizienzen in Abb. 1 zeigen, dass man für niedrige Laserpulsenergien über einen weiten Pulsabstandsbereich höhere Wirkungsgrade erreichen kann. Ein bis zu 0,4 % absolut höherer Wirkungsgrad wird mit optimalen Laserparametern bei 20 µm Pulsabstand auf einer LCP-Solarzelle im Vergleich zur Referenz erzielt. Durch die Verwendung von alternativen Metallisierungsverfahren wie Ni/Cu können noch höhere Zugewinne erreicht werden. Im Fall des hier verwendeten Siebdrucks wird der Füllfaktor auf

- 1 LCP-Solarzelleneffizienzen in Abhängigkeit des Pulsabstands für hohe und niedrige Pulsenergie im Vergleich zu Referenzzellen ohne selektiven Emitter unter Metallfingern.
- 2 Linienprofil einer 3-dimensionalen SIMS-Messung für einen Lasergraben mit niedriger Pulsenergie und kleinem Pulsabstand.

78,5 % erhöht, was die Verbesserung des Kontaktwiderstands durch den selektiven Emitter verdeutlicht. Hinsichtlich einer industriellen Anwendung ist dies ein wichtiges Ergebnis, da es zeigt, dass eine hohe Prozessgeschwindigkeit bis zu einigen Metern pro Sekunde möglich ist. In Abb. 1 sind auch Effizienzen für Solarzellen mit hoher Laserpulsenergie dargestellt. Die Effizienzen liegen durchgehend unterhalb der Referenzwerte, was auf eine Störung der Raumladungszone durch laserinduzierte Schädigung zurückzuführen ist. Hierdurch steigt die Ladungsträgerrekombination im geschädigten Bereich an.

Das zweidimensionale Linienprofil (Abb. 2) basiert auf einer dreidimensionalen Sekundärionenmassenspektroskopie-Messung (SIMS). Im Vergleich zur allgemein bekannten SIMS liegt die Nachweisgrenze für dieses 3-D SIMS bei höheren Phosphorkonzentrationen. Daher kann Phosphor nur bis 10^{18} - 10^{19} cm⁻³ detektiert werden. Das Profil zeigt einen homogen dotierten selektiven Emitter ohne Unterbrechungen für niedrige Pulsenergie und kleinen Pulsabstand. Ein hochdotierter Bereich mit einer Konzentration von mehr als 10^{20} cm⁻³ reicht bis zu einer Tiefe von 300 nm ins Silicium hinein. Der Phosphor ist in diesem Bereich homogen über die gesamte Schnittlänge verteilt, was auf ein mehrfaches Aufschmelzen und Wiedererstarren durch den kleinen Pulsabstand zurückzuführen ist. Das Linienprofil mit einer Länge von ca. 120 µm wurde insgesamt 80mal geschmolzen. Dies führt zudem dazu, dass viele Phosphoratome eindiffundieren können, welche das Dotierprofil homogenisieren.



MWT-PERC: UNSER NEUES KONZEPT FÜR INDUSTRIENAHE RÜCKKONTAKTZELLEN

Das MWT-PERC-Konzept vereint die Vorteile rückseitiger Kontaktierung mit einer Passivierung der Oberflächen. Dies ermöglicht den Einsatz neuartiger Modulkonzepte und erhöht die Effizienz gegenüber herkömmlichen Solarzellen deutlich. Mittels industrieller Herstellungsverfahren wurden am Fraunhofer ISE Wirkungsgrade von bis zu 18,8 % für monokristalline und 17,7 % für multikristalline großflächige MWT-PERC-Solarzellen erreicht.

Daniel Biro, **Florian Clement**, Tobias Fellmeth, Elmar Lohmüller, Alma Spribille, Benjamin Thaidigsmann, Andreas Wolf, Ralf Preu

Der Verzicht auf externe Kontakte auf der Solarzellenvorderseite (MWT-Konzept: Metal Wrap Through), eine optimierte Rückseitenverspiegelung sowie die Passivierung der Oberflächen und die Einführung lokaler Rückseitenkontakte (PERC-Konzept: Passivated Emitter and Rear Cell) sind die Hauptvorteile des MWT-PERC-Konzepts. Sie bewirken einerseits einen deutlich erhöhten Lichteinfall und andererseits eine signifikante Reduktion von Rekombinationsverlusten. Im Vergleich zur konventionellen Si-Solarzelle kann somit eine deutliche Effizienzsteigerung erreicht werden. Der Einsatz oberflächenpassivierter Rückseiten ermöglicht zusätzlich den Einsatz sehr dünner Si-Wafer als Ausgangsmaterial. Im Gegensatz zu rückseitig sammelnden Solarzellen erfolgt die Trennung der Ladungsträger an der Vorderseite der Solarzelle. Hierdurch sind die Anforderungen an die Materialgüte reduziert.

Ziel unserer Forschung ist die Entwicklung industriell umsetzbarer und ökonomisch sinnvoller Herstellungsverfahren für MWT-PERC-Solarzellen. Dabei werden zentrale Elemente konventioneller Solarzellenprozesse auf der Demonstrationsplattform unseres Photovoltaik Technologie Evaluationscenter (PV-TEC) weiterentwickelt und somit ein schneller Übertrag auf

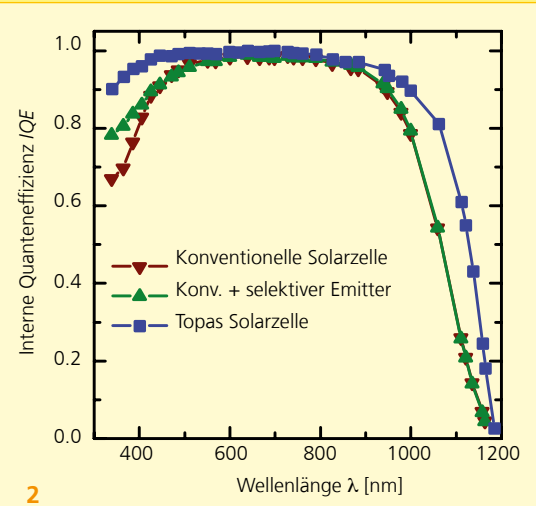
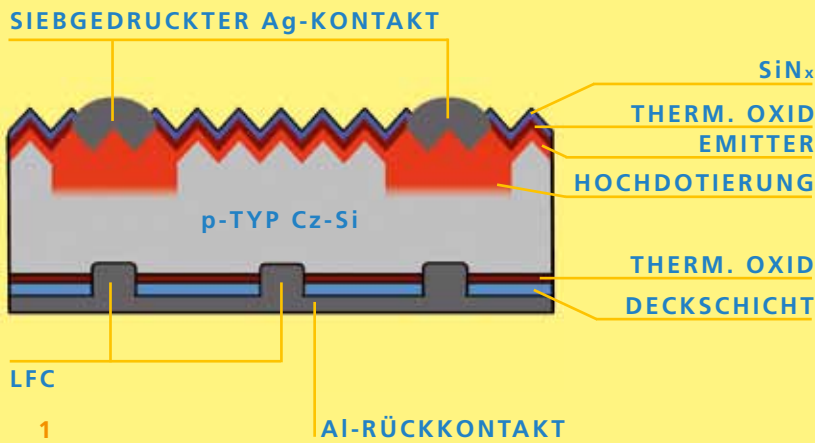
- 1 Lasergebohrte Öffnung zur Durchkontaktierung in einem monokristallinen Si-Wafer nach nasschemischer Behandlung.
- 2 Erreichte Wirkungsgrade auf multikristallinem Silicium für verschiedene Zellkonzepte. Die Solarzellenfläche beträgt 156 x 156 mm². Dargestellt sind Median (Querbalken), Mittelwert (x), Quartile (Box) und Mini- bzw. Maximalwerte (-).

die industrielle Produktion ermöglicht. Der von uns entwickelte Herstellungsprozess nutzt ausschließlich Siebdrucktechnologie zur Herstellung der Metallkontakte auf Solarzellenvorderseite und -rückseite. Zur Passivierung wird thermisch gewachsenes Siliciumoxid oder dynamisch abgeschiedenes Aluminiumoxid verwendet.

Auf multikristallinem Si-Material mit einer Kantenlänge von 156 mm werden Effizienzen bis zu 17,7 % erreicht. Durch die Verwendung von großflächigem monokristallinem Si-Material (Cz-Si) wird der Wirkungsgrad auf 18,8 % gesteigert. Das hohe Effizienzniveau konnte auch für sehr dünnes Si-Material (Ausgangsdicke ca. 120 µm) bestätigt werden.

Des Weiteren haben wir eine vereinfachte Herstellungssequenz für MWT-PERC Solarzellen entwickelt, die gegenüber dem Referenzprozess zur Herstellung passivierter Solarzellen nur einen zusätzlichen Prozessschritt benötigt. Der Aufwand zur Integration externer Rückseitenkontakte beider Polaritäten beschränkt sich somit auf das Bohren der Löcher für die Durchkontaktierung. Die mit der vereinfachten Herstellungssequenz erreichten Effizienzen liegen gleichauf mit denen der herkömmlich hergestellten MWT-PERC Solarzellen.

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



TOPAS: BEIDSEITIG OXID-PASSIVIERTE UND LOKAL LASERDIFFUNDIERTE SOLARZELLEN

Passivierte Oberflächen erlauben eine Steigerung des Solarzellenwirkungsgrads, da Rekombinationsverluste reduziert werden. Ein weiterer Ansatz zur Effizienzsteigerung besteht in der Einführung selektiver Emitterstrukturen. Am Fraunhofer ISE wurde ein Solarzellenprozess entwickelt, der die Vorteile beider Ansätze vereint und Wirkungsgrade im Bereich von 19 % ermöglicht.

Udo Belledin, Daniel Biro, Ulrich Jäger, Gero Kästner, Sebastian Mack, Edgar Allan Wotke, **Andreas Wolf**, Ralf Preu

Prozesse zur Herstellung von kristallinen Si-Solarzellen mit dielektrisch passivierter Rückseite werden derzeit in die industrielle Produktion überführt. Im Vergleich zu konventionellen, rückseitig vollflächig metallisierten Solarzellen, bewirkt die dielektrische Passivierschicht eine Reduktion der Oberflächenrekombination und einen verbesserten Lichteinfall, was zu einer deutlichen Erhöhung der Effizienz führt. Ein weiterer derzeit intensiv verfolgter Weg zur Wirkungsgradsteigerung ist die Implementierung selektiver Emitters. Statt einer homogen dotierten Vorderseite wird hierbei unter dem vorderseitigen Kontaktgitter ein hochdotierter Bereich und zwischen den Kontaktfingern ein moderat dotierter Bereich erzeugt. Diese Struktur verringert die Emitterrekombination und sichert gleichzeitig einen niedrigen Übergangswiderstand zwischen Emitter und Kontaktfinger.

Beide Ansätze sind in der am Fraunhofer ISE entwickelten TOPAS-Solarzellenstruktur (Thermal Oxide Passivated All Sides) vereint (Abb. 1). Sowohl der vorderseitige Emitter als auch die rückseitige Oberfläche sind durch eine dünne, thermisch gewachsene Si-Oxidschicht passiviert, die in einem kurzen Oxidationsprozess simultan auf Vorder- und Rückseite der Solarzelle erzeugt wird. Zur Konditionierung der Rückseite kommen seitenselektive nasschemische Ätzprozesse zum Einsatz, auf die Verwendung von Maskierungsschritten kann

1 Schematische Darstellung der TOPAS-Solarzellenstruktur.
2 Interne Quanteneffizienz verschiedener Solarzellentypen im Vergleich.

daher verzichtet werden. Zur lokalen Kontaktierung der Rückseite wird die ebenfalls am Fraunhofer ISE entwickelte LFC-Technologie (Laser Fired Contacts) eingesetzt. Die lokale Hochdotierung unter dem Vorderseiten-Kontakt wird mittels Laserdiffusion realisiert. Das nach dem Diffusionsprozess vorhandene Phosphorsilikatglas dient als Dotierstoffquelle.

Abb. 2 zeigt die interne Quanteneffizienz von drei unterschiedlichen Solarzellentypen: Unter Beibehaltung der konventionellen, vollflächig metallisierten Rückseite bewirkt die Einführung eines laserdiffundierten selektiven Emitters bereits eine Erhöhung der Ausbeute im kurzwelligen Spektralbereich. Die zusätzliche Passivierung des Emitters durch eine dünne thermische Oxidschicht bei der TOPAS-Solarzelle bewirkt nochmals eine deutliche Steigerung der Blauempfindlichkeit. Die Überlegenheit der passivierten Rückseite zeigt sich hingegen besonders in der besseren Ausnutzung des langwelligen Spektralbereichs.

In unserer PV-TEC Pilotfertigungslinie haben wir mit großflächigen, aus Czochralski (Cz) Silicium hergestellten TOPAS-Solarzellen Wirkungsgrade bis 18,9 %* mit Leerlaufspannungen von bis zu 645 mV* erreicht (* Messung am PV-TEC Zelltester nach Herstellungsprozess). Dies entspricht einer Effizienzsteigerung von ca. 1 % (absolut) gegenüber konventionellen monokristallinen Siliciumsolarzellen.

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



SUB- μm AUFLÖSUNG ZUR BESTIMMUNG VON REKOMBINATION UND DOTIERUNG

Viele hocheffiziente Solarzellkonzepte zeichnen sich durch kleinskalige Strukturen, z. B. lokale Rückseitenkontakte oder selektive Dotierungen auf Vorder- oder Rückseite der Zelle, aus. Etablierte Messmethoden sind bisher nicht in der Lage, die Rekombinationseigenschaften und die Strukturen selektiver Dotierung mit ausreichender lateraler Auflösung zu bestimmen. Durch Verwendung von Mikro-Photolumineszenzspektroskopie und Mikro-Raman-Spektroskopie ist es nun gelungen, die Shockley-Read-Hall-Lebensdauer und die Dotierkonzentration mit hoher Auflösung quantitativ zu bestimmen.

Paul Gundel, Friedemann Heinz, **Martin Schubert**, Wilhelm Warta, Stefan Glunz

Die Detektion der Band-zu-Band-Lumineszenz von optisch angeregten Ladungsträgern hat sich als ein sehr erfolgreiches Konzept erwiesen, um die Überschussladungsträgerdichte und damit die Ladungsträgerlebensdauer zu detektieren. Inzwischen lassen sich mit Photoluminescence Imaging ganze Wafer in Sekunden mit einer Ortsauflösung von etwa $100\ \mu\text{m}$ analysieren. Neben den Beschränkungen durch die verwendete CCD-Kamera steht hier insbesondere die laterale Ladungsträgerdiffusion einer Erhöhung der Auflösung entgegen.

Obwohl die so erreichbare Genauigkeit für eine Vielzahl von Aufgabenstellungen ausreichend ist, gibt es insbesondere bei hocheffizienten Solarzellen häufig Strukturen, die unterhalb dieser Auflösung liegen. So können die Rekombinationseigenschaften eines durch Laserbeschuss erzeugten Rückseitenkontakts nur über ihren großflächigen Effekt auf die Ladungsträgerdichte detektiert werden.

1 *Messung einer Siliciumprobe mit Mikro-Photolumineszenzspektroskopie.*

Es ist nun gelungen, die bisherige Auflösungsgrenze mit einem Trick deutlich zu unterschreiten: Anstatt einer homogenen Beleuchtung durch einen Laser mit relativ niedriger Photonenflussdichte wird bei dem neuen Verfahren die durch einen fokussierten Laser mit $532\ \text{nm}$ Wellenlänge angeregte Lumineszenzstrahlung spektral gemessen. Ein konfokales Mikroskop mit angeschlossenem Spektrometer und Zeilenkamera ersetzt die Kamera.

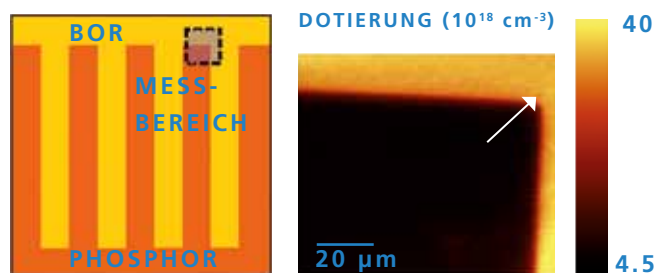
Durch die Konzentration auf einen Lichtfleck von $0,5\ \mu\text{m}$ können so sehr hohe Injektionsdichten erreicht werden. Damit limitiert Augerrekombination die Diffusionslänge von Ladungsträgern auf wenige Mikrometer. Durch die in diesem Injektionsbereich quadratische Abhängigkeit des Photolumineszenzsignals von der Überschussladungsträgerdichte und der konfokalen Detektion lässt sich so der effektive Messfleck auf $< 1\ \mu\text{m}$ einschränken. Zwar werden die Vorteile in der Auflösung durch eine wesentlich längere Messzeit durch Ab-rastern eines Probenausschnitts und erhöhte Anforderungen an die Oberflächenpräparation erkauft, entscheidend ist aber, dass es nun erstmals möglich ist, quantitative Messwerte der Shockley-Read-Hall-Lebensdauer auf solch kleinen Längenskalen zu erhalten. Hierfür müssen Einflüsse der Probenoberfläche sowie der Optik und der spektralen Detektionseinheit ausgeschaltet werden. Dies lässt sich erreichen, indem anstatt eines Absolutsignals der Quotient von zwei Messungen mit unterschiedlicher Tiefenschärfe ausgewertet wird. Dieser ist von allen linearen Einflüssen auf das Messsignal frei. Die Interpretation dieses Quotienten wird über eine zweidimensionale numerische Simulation der Ladungsträgerdichte in der Probe möglich, die sowohl die Augerrekombination als

auch die SRH-Rekombination berücksichtigt. Durch einen Vergleich der simulierten Werte mit den gemessenen kann sowohl die Shockley-Read-Hall-Lebensdauer als auch die Dotierung bestimmt werden. Die erreichte Ortsauflösung von $0,8 \mu\text{m}$ stellt eine bedeutende Verbesserung gegenüber den bisher verwendeten Messmethoden zur Bestimmung der Ladungsträgerlebensdauer dar. Mit dieser mikroskopischen Auflösungsfähigkeit und ihrer hohen Sensitivität für kleine Ladungsträgerlebensdauern und hohe Dotierungen ist die entwickelte Methode insbesondere zur detaillierten Charakterisierung mikroskopischer Dotierstrukturen geeignet. Neben der orts aufgelösten Dotierkonzentration kann auch die eventuelle Schädigung durch den Dotierprozess direkt gemessen und der Solarzellenprozess zielgerichtet optimiert werden.

Das Potenzial der Messmethode ist in Abb. 2 an der Rückseitenstruktur einer Solarzelle demonstriert, in deren Rückseite beide Kontakte integriert sind. Deutlich zu erkennen sind die zwei unterschiedlichen Dotierbereiche. Die Messung offenbart zudem einen mikroskopischen Mangel im Dotierprozess (Pfeil), der auf Grundlage dieser Messung vermieden werden kann. Die gemessenen Dotierdichten konnten mittels Elektrokapazitäts-Spannungsmessungen bestätigt werden.

Ebenso vielversprechend wie die Anwendung der Mikro-Photolumineszenz auf technologischen Mikrostrukturen ist die Verwendung zur Untersuchung von mikroskopischen Defekten wie Präzipitaten, Versetzungen und Korngrenzen. Die quantitative Lebensdauerermessung mit Sub-Mikrometer-Auflösung ist in Abb. 3 an einem Nickelpräzipitat gezeigt. Durch die hohe Ortsauflösung kann der Einfluss einzelner Defekte auf die Ladungsträgerlebensdauer und die Veränderung während des Solarzellenprozesses separat analysiert werden.

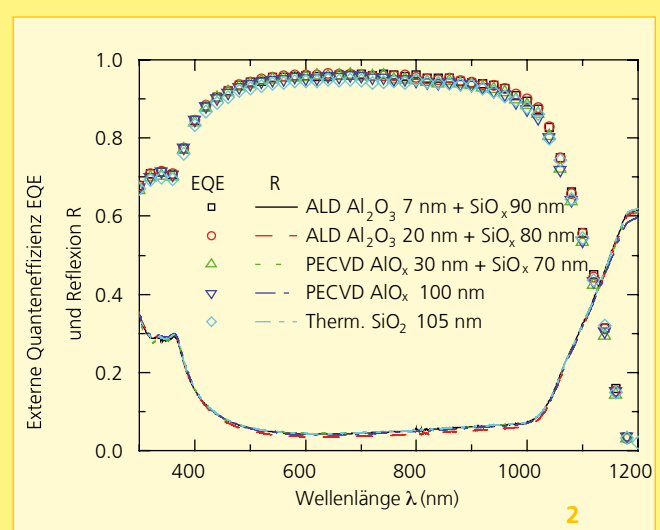
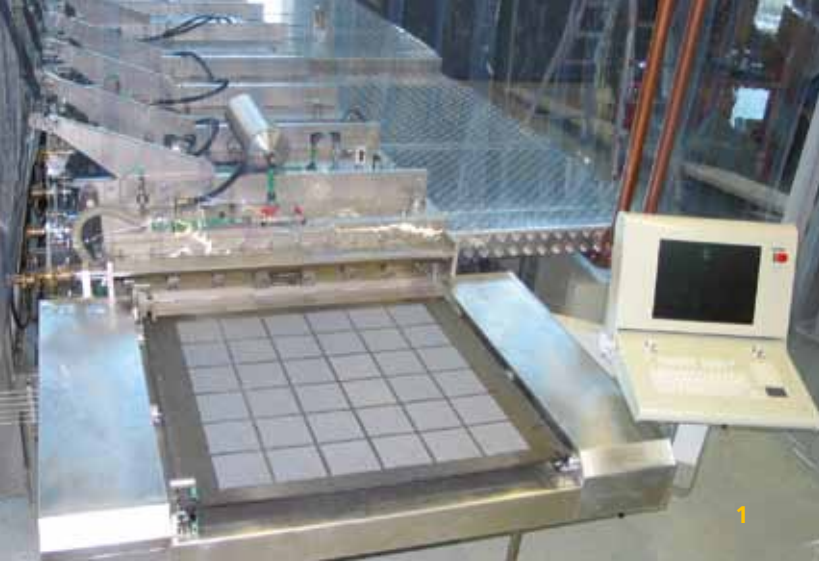
Die Arbeiten wurden im Rahmen des Fraunhofer Eigenforschungsprojekts »Silicon-Beacon« gefördert.



2 Dotierstruktur auf der Zellrückseite (links) und aus der Photolumineszenzmessung resultierende Dotierdichte (rechts).



3 Lebensdauerermessung um ein Nickelpräzipitat an einem Korngrenzen-Triplepunkt mit Mikro-Photolumineszenz.



RÜCKSEITENPASSIVIERUNG FÜR SILICIUM-SOLARZELLEN MITTELS ALUMINIUMOXID

Oberflächenpassivierung ist eine Schlüsselkomponente bei der Entwicklung hocheffizienter kristalliner Si-Solarzellen. Aluminiumoxidschichten sind hervorragend geeignet, um p-dotiertes Silicium zu passivieren. Durch unsere Entwicklung eines plasma-basierten Hochraten-Abscheidungsprozesses steht nun erstmals eine industrietaugliche Prozesstechnologie zur Abscheidung solcher Schichten zur Verfügung.

Jan Benick, Etienne Billot, Martin Hermlle, **Marc Hofmann**, Daniel Kania, Jan Nekarda, Peter Olwal, Jochen Rentsch, Armin Richter, Pierre Saint-Cast, Stefan Glunz, Ralf Preu

Die Herstellungskosten für kristalline Si-Solarzellen haben sich in den vergangenen Jahren stark verringert. Zur Fortsetzung dieses Trends streben wir eine Erhöhung des Solarzellenwirkungsgrads, z. B. durch den Übergang zu rückseitig passivierten Solarzellen, an.

Für die Passivierung der Solarzellenrückseite bieten sich verschiedene dünne, meist dielektrische Schichten an: Siliciumnitrid, Siliciumoxid, amorphes Silicium oder Aluminiumoxid. Zur Implementierung der Rückseitenpassivierungsschicht in der industriellen Solarzellenproduktion sind neben der Passivierungsqualität auch optische Eigenschaften und die Stabilität in anderen Produktionsprozessen von entscheidender Bedeutung.

Aluminiumoxid bietet einen besonderen Vorteil gegenüber den anderen Alternativen. Es stellt ortsfeste negative Ladungen bereit, die zu einer vorteilhaften Bandverbiegung in p-Typ Silicium führen. Die Aufbringung von Aluminiumoxidschichten bei niedrigen Prozesstemperaturen kann z. B. mittels atomarer Schichtabscheidung (Atomic Layer Deposition ALD) oder plasma-angeregter chemischer Gasphasenabscheidung (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition PECVD)

1 Prototyp einer PECVD-Anlage zur Hochraten-Abscheidung von Aluminiumoxidschichten für die Oberflächenpassivierung kristalliner Si-Solarzellen. Im Bildvordergrund ist ein Waferträger zu sehen, der Platz für 6 x 6 Wafer (125 mm Kantenlänge) bietet. Alternativ können auch 25 Wafer mit 156 mm Kantenlänge beschichtet werden.

2 Externe Quanteneffizienzen und Reflexionskurven für hocheffiziente Solarzellen mit ALD- und PECVD-AlO_x-Rückseitenpassivierung im Vergleich zu thermischem SiO₂.

erfolgen. ALD wird in der Mikroelektronik verwendet, um stöchiometrische, nahezu ideale Schichten herzustellen. Die verwendete Anlagentechnologie ist aber für die Photovoltaik ungeeignet, so dass derzeit an PV-kompatiblen Systemen gearbeitet wird.

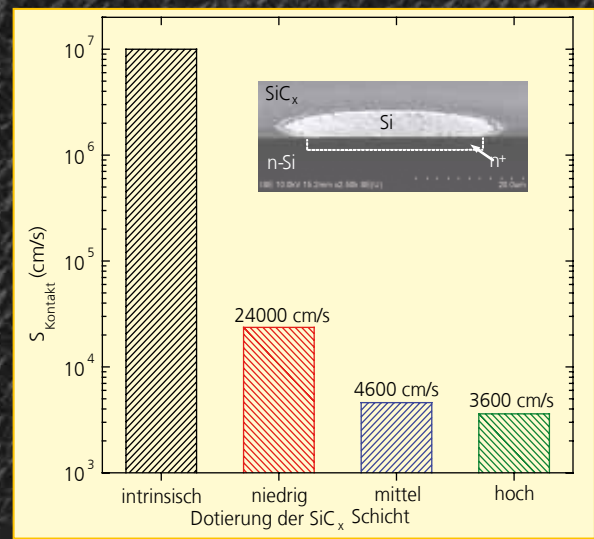
Für die PECVD ist es uns erstmals gelungen, einen Prozess zu entwickeln, der die dynamische Abscheidung von hochpassivierenden Aluminiumoxidschichten mit sehr hohen Raten (~80 nm/min) auf großen Flächen erlaubt. Die Entwicklung haben wir auf einer adaptierten SiNA-Anlage der Firma Roth & Rau durchgeführt.

Beide Prozessansätze wurden auf hocheffizienten Zellstrukturen am Fraunhofer ISE verglichen und zeigten sehr gute Ergebnisse mit Wirkungsgraden von 21,3 % (7 nm ALD-AlO_x + 90 nm PECVD-SiO_x) und 21,5 % (100 nm PECVD-AlO_x). In Abb. 2 sind die externen Quanteneffizienzen sowie die Reflexionswerte für beide Ansätze zu sehen. Zusätzlich sind dort die Ergebnisse für zwei weitere Schichtstapel sowie thermisch gewachsenenes Siliciumdioxid (105 nm) gezeigt. Mit allen Schichten wird ein vergleichbares, sehr gutes Niveau erreicht.

Diese Arbeit wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.

200 μm

1



INDUSTRIELLE UMSETZUNG HOCHEFFIZIENTER N-TYP SOLARZELLEN

Im Labor haben wir mit einer n-Typ Solarzelle mit Bor-diffundiertem Emitter auf der Vorderseite Wirkungsgrade bis zu 24 % erreicht. Unser Ziel war es nun, Technologien zur industriellen Umsetzung dieses Konzepts zu entwickeln. Mit gedruckten Vorderseitenkontakten und ganzflächig metallisierter Rückseite erreichten wir einen Wirkungsgrad von 19,6 % auf großer Zellfläche. Mit einem neuartigen Konzept für eine industriell umsetzbare Rückseitenpassivierung, einer Kombination aus Passivierungsschicht und Laserprozess, konnten wir auf kleiner Fläche einen Wirkungsgrad bis 22,4 % erreichen.

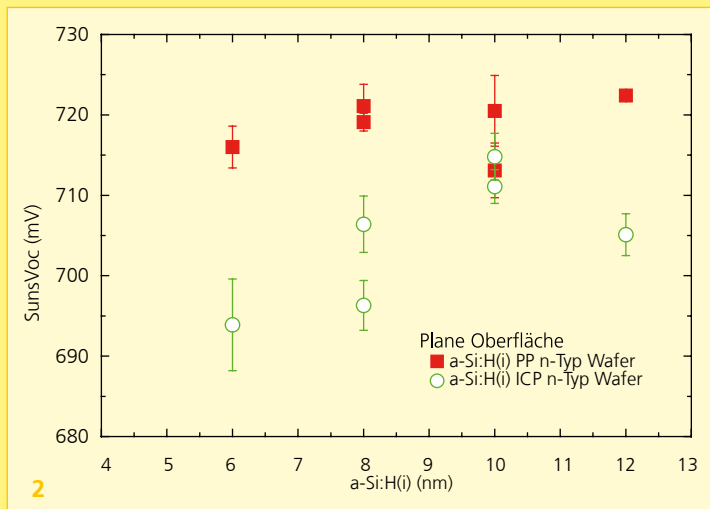
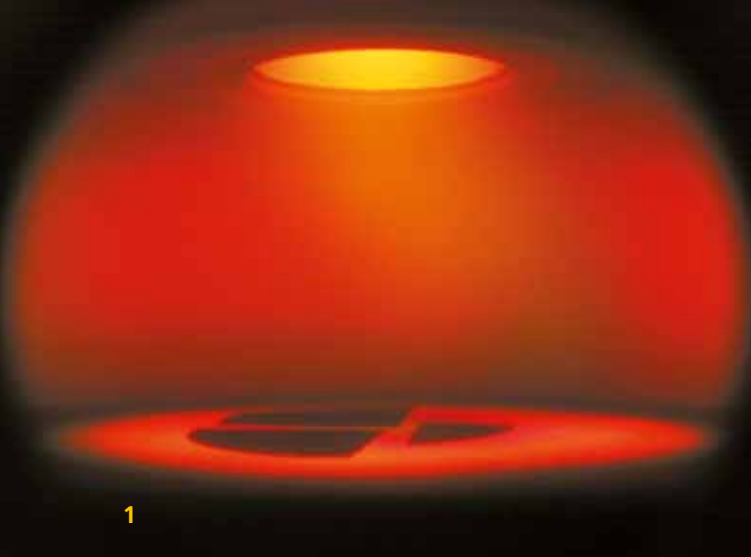
Jan Benick, **Martin Hermle**, Matthias Hörteis, Ulrich Jäger, Stefan Janz, Nicolas König, Antonio Leimenstoll, Michael Rauer, Armin Richter, Elisabeth Schäffer, Felix Schätzle, Christian Schmiga, Sonja Seitz, Dominik Suwito, Karin Zimmermann, Stefan Glunz

Durch die kontinuierliche Optimierung der Solarzellenprozesse und die Verbesserung des Wirkungsgrads rückt die Materialqualität des Substrats immer mehr in den Vordergrund. n-Typ Silicium hat hierbei gegenüber dem bisher verwendeten p-Typ Silicium deutliche Vorteile. Die Herausforderung besteht nun darin, einen qualitativ hochwertigen p-dotierten Emitter herzustellen. Für rückseitig sammelnde Solarzellen ist die Verwendung von siebgedruckten und anschließend einlegierten Aluminium-Emittern die einfachste Methode. Mit diesem Konzept konnten wir Wirkungsgrade bis zu 20,1 % auf kleinen Flächen realisieren. Qualitativ hochwertigere Emitter lassen sich jedoch durch Diffusion von Bor erzielen. In unserem Reinraum konnten wir mit einer n-Typ Solarzelle mit Bor-diffundiertem Emitter und photolithographisch erzeugten Kontaktöffnungen einen Wirkungsgrad von 23,9 % erzielen. Photolithographische Prozesse sind jedoch nicht industriell umsetzbar. Das Feuern von metallischen Saatschichten durch Passivierungsschichten und anschließender galvanischer Ver-

1 Hintergrund: Vorderseite n-Typ Solarzelle mit statistischen Pyramiden und gedrucktem und galvanisch verstärktem Kontaktfinger; Grafik: Gemessenen Rekombinationsgeschwindigkeit des PassDop-Kontakts als Funktion der Dotierstoffkonzentration der SiC-Schicht.

stärkung ist dagegen eine industriell umsetzbare Technologie und wird bereits für p-Typ Solarzellen eingesetzt. Mit einer eigens entwickelten metallischen Tinte ist es uns nun gelungen, hochohmige Bor-Emitter zu kontaktieren, wobei spezifische Kontaktwiderstände im Bereich von 1 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ erreicht wurden. Diese Emitter lassen sich mit einer einfachen Schichtfolge aus Al_2O_3 und SiN_x hervorragend passivieren, so dass Emitter-sättigungsströme von deutlich unter 50 fA/cm^2 nach Kontaktfuern realisierbar sind. Zur Potenzialabschätzung wurden einfache Solarzellen mit einem ganzflächig diffundierten Back Surface Field und vollflächiger Rückseitenmetallisierung hergestellt. Auf kleiner Zellfläche konnten so Wirkungsgrade bis zu 20,5 % erreicht werden. Hervorzuheben ist auch der erreichte Füllfaktor von über 81 %. Bei der Umsetzung des Konzepts auf großen Zellflächen konnte ein Wirkungsgrad von 19,6 % erreicht werden. Diese Solarzelle ist nun hauptsächlich durch die unpassivierte Rückseite limitiert.

Mit der Entwicklung des PassDop-Prozesses konnten wir einen großen Schritt zu höchsten Wirkungsgraden vollziehen. Die verwendete PassDop-Schicht ermöglicht einerseits eine hervorragende Passivierung der rückseitigen n-Typ Oberfläche, andererseits beinhaltet sie Dotierstoffe, die in einem Laserprozess während der lokalen Öffnung der Rückseitenpassivierung für die Kontaktierung eingetrieben werden können. Die Schicht ist auch als optischer Reflektor geeignet, so dass die interne Reflexion sehr hoch ist. n-Typ Solarzellen auf kleinen Flächen mit dieser Rückseite erreichten einen Wirkungsgrad bis zu 22,4 % und eine Offenkreisspannung > 700 mV. Der Mittelwert von über 75 Solarzellen lag bei 22,2 %, was die Reproduzierbarkeit und Homogenität des Prozesses unterstreicht.



HOCHEFFIZIENTE SILICIUMSOLARZELLEN MIT HETEROÜBERGANG

Eine effektive Reduzierung der Oberflächenrekombination ist Grundvoraussetzung für höchste Wirkungsgrade bei Si-Solarzellen. Eine besonders gute Passivierung lässt sich durch die Verwendung von amorphem Silicium erreichen. Werden die Schichten auf der Vorder- und Rückseite zusätzlich noch dotiert, lassen sich damit sehr hocheffiziente Solarzellen herstellen, so genannte amorph-kristalline Si-Heterosolarzellen.

Martin Bivour, Lena Breitenstein, Ines Druschke, **Martin Hermle**, Nicolas König, Christoph Meinhard, Damian Pysch, Christian Reichel, Kurt-Ulrich Ritzau, Christian Schetter, Sonja Seitz, Harald Steidl, Karin Zimmermann, Stefan Glunz

Hocheffiziente amorph-kristalline Si-Heterosolarzellen (a-Si/c-Si) sind wegen ihres hohen Wirkungsgradpotenzials im Fokus der aktuellen Solarzellenforschung. Aufgrund der effektiven Passivierung der Oberflächen durch die amorphen Si-Schichten lassen sich sehr hohe Spannungen erreichen. Die Abscheidung der amorphen Schichten erfolgt normalerweise mittels plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (PECVD). Hierzu steht uns am Fraunhofer ISE eine Plasma-Cluster-Anlage zur Verfügung, mit der wir in der Lage sind, in verschiedenen Kammern unterschiedliche Schichten sequenziell abzuscheiden. Neben der klassischen und weit verbreiteten Parallelplatten (PP) Konfiguration haben wir auch eine Plasmaquelle mit induktiv gekoppeltem Plasma (ICP) zur Verfügung. Mit beiden Plasmaquellen konnten hervorragende Ergebnisse hinsichtlich der Passivierung der Si-Wafer erreicht werden (Abb. 2). Jedoch kann bei der ICP-Quelle die Abscheiderate deutlich geringer eingestellt werden, was uns die Möglichkeit gibt, die Abscheidung besser kontrollieren und auch manipulieren zu können. Als Beispiel ist hier die Variation der Dotierstoffhöhe innerhalb einer 10 nm dünnen Emitter-Schicht zu erwähnen. Durch die Veränderung der

1 Blick in die Plasmakammer am Fraunhofer ISE.

2 Maximal erreichbare Spannungen bei Verwendung unterschiedlicher Abscheidequellen (PP und ICP) als Funktion der a-Si(i)-Schichtdicke.

Dotierstoffkonzentration innerhalb der Emitterschicht lassen sich die Passiviereigenschaften und die Leitfähigkeit verändern. So lassen sich Dotiergradienten in nahezu beliebiger Form einstellen und deren Einfluss auf die Solarzellencharakteristik untersuchen. Erste experimentelle Ergebnisse zeigen, dass mit einem linearen Dotiergradient ein Wirkungsgradgewinn gegenüber der Referenzstruktur mit konstantem Dotierprofil erreicht werden kann.

Ein inhärenter Nachteil a-Si/c-Si Heterosolarzellen ist die nicht nutzbare Absorption von Licht in der vorderseitigen amorphen Emitterschicht. Diese reduziert den möglichen Kurzschlussstrom der Solarzelle und limitiert ihren Wirkungsgrad. Um dies zu umgehen kann der amorphe Emitter auf die Rückseite der Solarzelle platziert werden. Dadurch ergeben sich neue Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich Dotierung und Schichtdicke der amorphen Schicht. Ein weiterer Vorteil dieses Konzepts liegt darin, dass auf das sonst übliche leitfähige transparente Oxid (TCO) verzichtet werden kann, bzw. das Optimierungsfenster für das TCO sehr groß ist, da keine laterale Leitfähigkeit notwendig ist.

Zur Passivierung der Vorderseite können bekannte Methoden wie die Verwendung eines Vorderseitenfelds oder passivierende dielektrische Schichten verwendet werden, die einen höheren Kurzschlussstrom erlauben. Mit solch einer Struktur konnten wir bereits Wirkungsgrade bis zu 19,6 % erzielen.

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



LINIENOPTIMIERUNG UND PROZESSTRANSFER

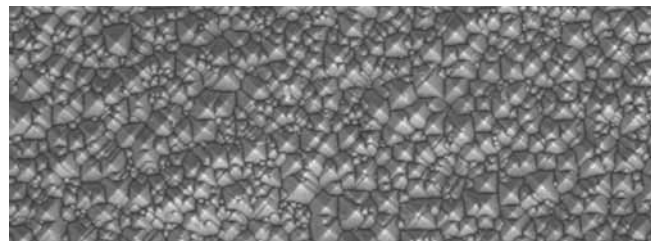
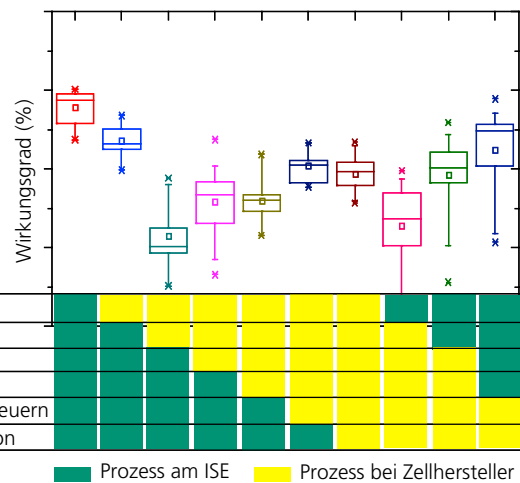
1 Nasschemische Prozessanlagen des Photovoltaik Technologie Evaluationscenter (PV-TEC) am Fraunhofer ISE.

Die Verbesserung der Leistungsfähigkeit einer Solarzellen-Produktionslinie in Bezug auf Wirkungsgrad sowie Kostenersparnis stellt eine der wesentlichen Herausforderungen heutiger Solarzellenhersteller dar. Das Fraunhofer ISE unterstützt Firmen bei der Identifikation und Verbesserung leistungsmindernder Prozessschritte bzw. bei der Einführung neuartiger, innovativer Prozesssequenzen.

Udo Belledin, Katrin Birmann, Daniel Biro, Florian Clement, Denis Erath, Markus Glatthaar, Marc Hofmann, Norbert Kohn, Jan Nekarda, **Jochen Rentsch**, Andreas Wolf, Winfried Wolke, Martin Zimmer, Ralf Preu

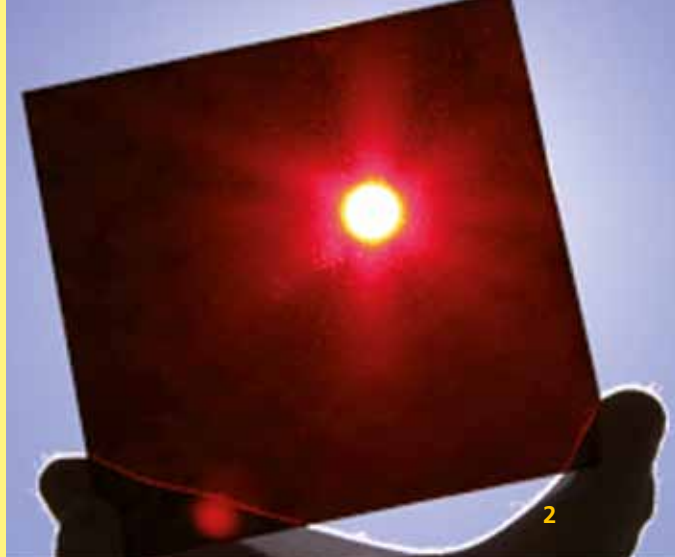
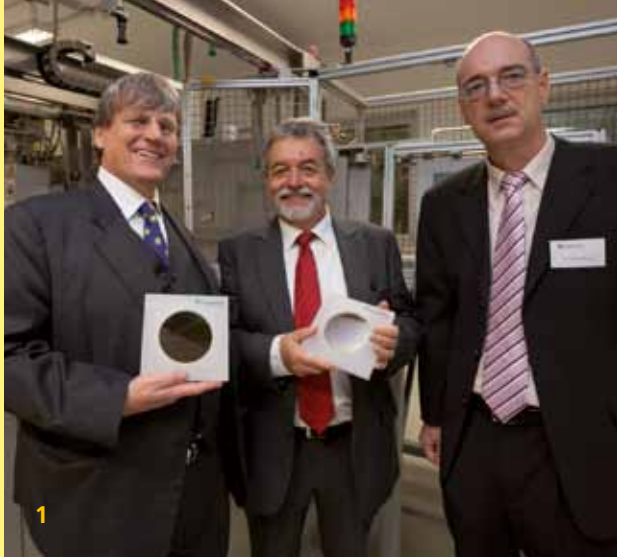
Das Ziel unserer Zusammenarbeit mit dem jeweiligen Solarzellenhersteller ist die schnelle Prozessstabilisierung und -optimierung sowie das Aufzeigen zukünftiger Weiterentwicklungsmöglichkeiten in der Prozesstechnik sowie im Zeldesign. Bei der Linienoptimierung wird zunächst der jeweils aktuelle Status eines jeden Herstellungsschritts erfasst. Die Untersuchungen beinhalten dabei neben der Zelltechnologie auch die Beurteilung und Charakterisierung des dem Solarzellenhersteller zur Verfügung stehenden Si-Materials.

Im Rahmen von Verlustanalysen werden den jeweiligen Prozesslinien des Solarzellenherstellers sukzessive Si-Wafer nach jedem relevanten Prozessschritt entnommen bzw. entsprechende am Fraunhofer ISE vorprozessierte Si-Wafer eingespeist. Aus dem Kreuzvergleich des Prozessschritts des Solarzellenherstellers mit den korrespondierenden Referenzprozessen am PV-TEC können mittels umfangreicher Charakterisierungsmöglichkeiten am Fraunhofer ISE somit gegebenenfalls den Wirkungsgrad limitierende Prozessschritte identifiziert werden. In weiteren Optimierungszyklen werden in der Folge die identifizierten Prozessschritte mittels gemeinsam ausgearbeiteter Prozesspläne weiterentwickelt.



2 Typisches Ergebnis eines Prozess-Kreuzvergleichs mit einem Solarzellenhersteller (oben), Prozessergebnis einer alkalischen Textur auf monokristallinem Silicium (unten).

Neben der Beurteilung und Optimierung ganzer Prozesslinien transferiert das Fraunhofer ISE auch einzelne Prozesse bzw. Prozesssequenzen in bestehende Linien der Solarzellenhersteller. In der Vergangenheit wurde z. B. die alkalische Textur für monokristallines Silicium bei einer Reihe von Solarzellenherstellern in die Produktion eingeführt. Der Prozesstransfer umfasst dabei Beratungsdienstleistungen bei der Auswahl von geeignetem Equipment, den Transfer sowie die erstmalige Einstellung erfolgversprechender Prozessparameter und die Ermittlung der zumeist gerätespezifischen Prozesseinstellungen für den Dauerbetrieb beim Kunden.



10 JAHRE FRAUNHOFER ISE LABOR- UND SERVICECENTER GELSENKIRCHEN

Im Oktober 2000 ging das Fraunhofer ISE Labor- und Servicecenter LSC Gelsenkirchen, mit Unterstützung der nordrhein-westfälischen Landesregierung, an den Start. Zielsetzung war, beispielhafte Rahmenbedingungen für das Zusammenspiel von industrienaher Forschung, Industrie und Nutzern zu schaffen. Nach zehn erfolgreichen Jahren feierte die Einrichtung am 5. November 2010 Jubiläum und konnte gleichzeitig ein neues Labor am Standort in Betrieb nehmen.

Dietmar Borchert, Martina Dörenthal, Sinje Keipert-Colberg, Amada L. Montesdeoca-Santana, Stefan Müller, Markus Rinio, Petra Schäfer, Johannes Ziegler, Ralf Preu

Um die Forschungsergebnisse unmittelbar der Fertigung zugute kommen zu lassen, war das Fraunhofer ISE Labor- und Servicecenter in enger Kooperation mit der Industrie aufgebaut worden. Forschung unter industrienahen Bedingungen und die direkte Umsetzung der Laborergebnisse in die Produktion standen im Mittelpunkt. »Produzieren wie in der Fabrik, experimentieren wie im Labor« war das Motto der ersten Jahre. Zu diesem Zweck wurde die erste Pilotlinie zur Herstellung von multikristallinen Solarzellen im Industrieformat des Fraunhofer ISE in Gelsenkirchen in Betrieb genommen.

In den Anfangsjahren standen Technologieunterstützung sowie Materialuntersuchungen für die PV-Industrie in Nordrhein-Westfalen im Fokus. Später kam die Materialevaluierung von multikristallinem Silicium hinzu, das »Troubleshooting« für laufende Produktionslinien, die Optimierung von Durchlauf-Prozesslinien sowie der Aufbau von spezieller Messtechnik für Solarzellen. Zum Portfolio gehören dabei das FAKIR-System zur schnellen Messung von Schichtwiderständen, ein einfaches System zur Detektion von Kurzschlüssen in mono- bzw. multikristallinen Silicium-Solarzellen, ein System zur Messung der spektralen Empfindlichkeit von Einfach- und Tandemzellen

1 10 Jahre Fraunhofer ISE Labor- und Servicecenter LSC Gelsenkirchen: Prof. Eicke R. Weber (Institutsleiter Fraunhofer ISE), Dr. Heinz Baues (Ministerium für Klimaschutz, Umweltschutz, Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz in NRW), Dr. Dietmar Borchert (Leiter LSC Gelsenkirchen) – von links nach rechts.

2 Lichtabsorption einer mit dünnem amorphem Silicium beschichteten Glasplatte.

sowie ein System zur Bestimmung der Defektdichte in amorphem Silicium. Weitere Aktivitäten in den letzten Jahren waren die Charakterisierung und Entwicklung von Passivierungsschichten für multikristalline Silicium-Solarzellen, sowie Consulting und Training.

Mit dem 10jährigen Jubiläum war auch eine räumliche und thematische Erweiterung des Fraunhofer LSC Gelsenkirchen verbunden. Für die neuen Themenschwerpunkte großflächige Silicium-Heterosolarzellen und Silicium-Dünnschicht-Solarzellen wurde ein rund 400 m² großes neues Technologielabor in Betrieb genommen. Mit dieser Kapazitätsausweitung am Standort Gelsenkirchen wird der rasanten Entwicklung des Photovoltaikmarkts im Bereich Dünnschicht und den Nachfragen der Industrie Rechnung getragen.

Zur Weiterentwicklung beider Technologiebereiche wurde eine 3-Kammer-Beschichtungsanlage als Erstausrüstung des neuen Labors beschafft. Diese ermöglicht die Abscheidung von dotierten und undotierten amorphen (Abb. 2) und mikrokristallinen Silicium-Schichten mittels PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) auf einer Fläche von 40 x 40 cm². Basierend auf einem vorhandenen Basisprozess werden a-Si/ μ c-Si und a-Si-Stapelsolarzellen im Pilotformat entwickelt.



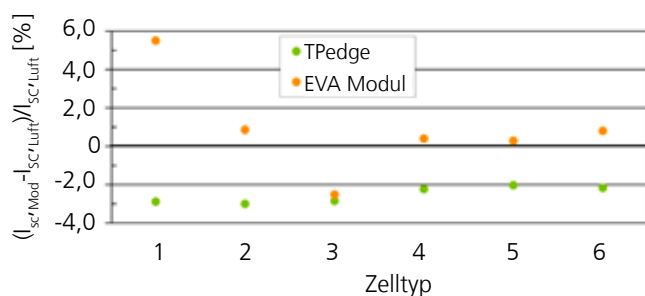
TPedge: KOSTENSENKUNG DURCH RANDVERSIEGELTE SOLARMODULE

In herkömmlichen Modulen werden die Solarzellen zwischen Glas, Einkapselungsmaterial und Rückseitenfolie einlaminiert. Um Material- und Prozesskosten spürbar zu senken, entwickelt das Fraunhofer ISE zusammen mit Bystronic Lenhardt und Schmid Technology Systems ein randversiegeltes Solarmodul (Abb. 1). Das Modulkonzept verzichtet auf Einbettung und fixiert die Zellen stattdessen in einem luftgefüllten Spalt zwischen zwei Glasscheiben.

Ingrid Hädrich, Max Mittag, Harry Wirth

Ein Forschungsschwerpunkt des TPedge-Projekts ist die Analyse und Optimierung der Leistungs- und Ertrageigenschaften der Moduleinkapselung. Hierbei werden optische und thermische Effekte im Modulaufbau betrachtet. Vor allem die optische Einkopplung von Licht durch die umgebenden Modulschichten wurde für das TPedge-Modul im Vergleich zu einer Standardeinkapselung mit EVA genauer untersucht. Während die Solarzelle im Referenz-Modulaufbau hinter einer einseitig antireflexbeschichteten Glasscheibe zwischen zwei Lagen aus Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA) eingebettet ist, befindet sich die Zelle im TPedge-Modul hinter einer beidseitig antireflexbeschichteten Glasscheibe in einer Luftumgebung. Für die Analyse wurden optische Randeffekte ausgeschlossen. Durch spektrale Charakterisierung der Materialien in Verbindung mit Berechnungsmodellen können wir die einkapselungsbedingten optischen Gewinne und Verluste im Einzelnen darstellen. Aus einem direkten Vergleich der beiden Modulkonzepte für verschiedene Zelltypen vor und nach der Einkapselung im Modul zeigte sich, dass vor allem die Qualität von Zellbeschichtung und -textur sowie der Verteilung der spektralen Empfindlichkeit einen deutlichen Einfluss auf die Leistungsveränderung der Zelle im Modul hat. Kommerzielle Zellen mit einer hochwertigen Textur konnten im TPedge-Modul ähnliche oder gleiche Leistung erreichen

1 TPedge-Modul 950 x 750 mm².



2 Prozentuale Veränderung des Kurzschlussstroms (I_{sc}) durch Einkapselung in das neue TPedge-Modul bzw. in ein EVA-Standardmodul.

wie im Referenzaufbau. Des Weiteren sind Zellen mit einer hohen spektralen Empfindlichkeit im Bereich des kurzwelligen Lichts bei der Einbettung in EVA benachteiligt, da diese ein Teil des für die Zelle leistungsrelevanten Lichtes absorbiert. Dieser Effekt betrifft Zelltechnologien, z. B. selektive Emittierzellen, die derzeit auf den Markt kommen.

Neben den Leistungs- und Ertrageigenschaften haben wir in der TPedge-Entwicklung frühzeitig Fragen der Zuverlässigkeit untersucht, orientiert an den Anforderungen der IEC 61215. Die Beständigkeit gegen Hagelschlag und mechanische Flächenlast konnte für ein 20-Zellmodul der Größe 950 x 750 mm² erfolgreich nachgewiesen werden.

Dieses Projekt wird durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

STROM AUS SONNENLICHT



ALTERNATIVE PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIEN

In Ergänzung zur Silicium-Photovoltaik (s. S. 52 ff.) erstreckt sich unsere Solarzellenforschung und -entwicklung auf weitere Photovoltaik-Technologien: III-V-basierende Halbleiter, Farbstoffsolarzellen und organische Solarzellen, die Konzentrator-technologie und neuartige Konzepte für die Photovoltaik.

III-V-basierende Halbleiter

Mehrfachsolarzellen auf Basis von III-V Halbleitern wie Galliumindiumphosphid, Aluminiumgalliumarsenid oder Galliumarsenid erzielen heute die höchsten Wirkungsgrade unter den Solarzellen. Der an unserem Institut erzielte Bestwert beträgt 41,1% bei 454facher Sonnenkonzentration. Dreifachsolarzellen aus GaInP/GaInAs/Ge werden bereits seit Jahren erfolgreich im Weltraum eingesetzt. Im Zusammenspiel mit der optischen Konzentration des Sonnenlichts haben wir daran mitgewirkt, dass sie nun auch erfolgreich terrestrisch in den Markt eingeführt werden konnten. Neben den beiden genannten Märkten bedienen wir mit den III-V Solarzellen noch Spezialmärkte wie die Laser-Leistungsübertragung, die Thermophotovoltaik und weitere Sonderanwendungen.

Für die extraterrestrische Anwendung arbeiten wir derzeit schwerpunktmäßig an strahlungsresistenten Tripel- bis Sextupel-Zellen. Für die Weltraumanwendung wichtig sind Zellen mit geringem Gewicht. Wir arbeiten daher an der Entwicklung von sehr dünnen Zellen mit nur wenigen Mikrometer Dicke. Dazu entwickeln wir Techniken, welche die Solarzellenstrukturen vom Substrat trennen und auf andere Träger übertragen lassen. Unter anderem haben wir das so genannte »Wafer-Bonding« sehr erfolgreich eingesetzt und können hierdurch neue Materialkombinationen realisieren. Weiterhin arbeiten wir daran, III-V Halbleiterstrukturen auf ein Silicium-Substrat zu epitaxieren. Dabei erforschen wir zentrale Fragen im Materialbereich, wie Techniken zur Überwindung von Gitterfehlpassung und Spannungskompensation.

Farbstoffsolarzellen

Die Technologie der Farbstoffsolarzellen hat sich in den letzten Jahren deutlich über den Labormaßstab hinaus entwickelt. Wir konnten zeigen, dass mit Siebdruck- und neuen Versiegelungstechniken Farbstoffsolarzellenmodule in industrienahen Techniken gefertigt werden können. Die Möglichkeit, gestalterische Aspekte umzusetzen, wurde in Prototypen gezeigt. Die Beständigkeit der Module wird im Labor und unter Außenbewitterung getestet. Neben der Entwicklung von Zell- und Herstellungskonzepten stehen Arbeiten zur Aufskalierung von Farbstoffsolarmodulen für die Anwendung im Architekturbereich im Vordergrund.

Organische Solarzellen

Organische Solarzellen sind insbesondere aufgrund der erwarteten niedrigen Herstellungskosten attraktiv. Die hohe mechanische Flexibilität erweitert die zukünftigen Einsatzgebiete für Photovoltaik. Wir entwickeln neue Zellarchitekturen, die basierend auf kostengünstigen Materialien mit effizienten Verfahren hergestellt werden können. Ziel dieser Entwicklungen ist die Produktion im Rolle-zu-Rolle-Verfahren. So konnten wir erste Solarzellenmodule mit Technologien herstellen, die sich in eine kontinuierliche Produktion überführen lassen. Auf dem Weg zu höheren Effizienzen und Lebensdauern untersuchen wir neue organische Halbleiter und Elektroden sowie in beschleunigten Alterungstests die Eignung von Verkapselungsmaterialien. Inzwischen konnten wir Zellwirkungsgrade von 5,4 % erreichen. Lebensdauern von einigen Jahren sind inzwischen realistisch.

Konzentrator-technologie

Für den terrestrischen Einsatz von III-V-basierenden Solarzellen entwickeln wir im ConTEC, dem Concentrator Technology and Evaluation Center, Module und Systeme, die das Sonnenlicht um einen Faktor > 300 konzentrieren. Für Konzentrations-fak-



toren < 100 setzen wir Siliciumsolarzellen ein. Wir entwickeln und untersuchen langzeitstabile Löt- und Klebeverbindungen mit einer hohen Temperaturzyklenfestigkeit. Zusätzlich simulieren wir die thermomechanischen Effekte in Konzentratormodulen und führen beschleunigte Alterungstests durch bzw. entwickeln neue angepasste Testverfahren. Ein Beispiel für die erfolgreiche Modulentwicklung ist die am Fraunhofer ISE entwickelte FLATCON®-Technologie, die heute von unserem Spin-off Concentrix Solar GmbH erfolgreich produziert wird.

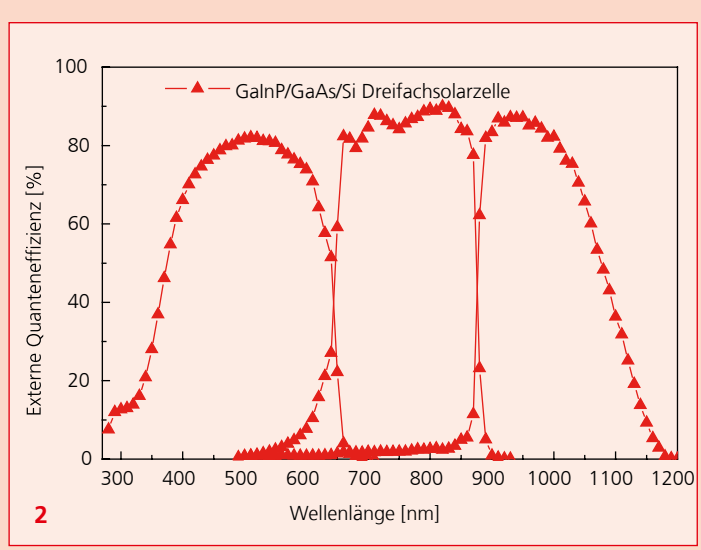
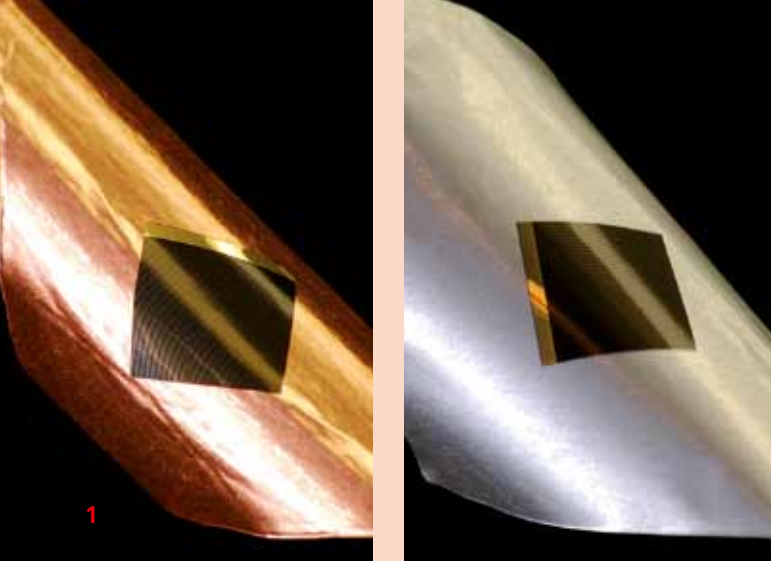
Neuartige Solarzellenkonzepte und Photonenmanagement

Wir entwickeln Konzepte und Technologien, mit denen sich die prinzipiellen Beschränkungen des Wirkungsgrads herkömmlicher Solarzellen überwinden lassen. Ein Konzept ist das Photonenmanagement. Es zielt darauf, den Wirkungsgrad zu erhöhen, indem das Sonnenspektrum aufgeteilt oder verändert wird, bevor es von Solarzellen absorbiert wird. Ein Beispiel ist die Hochkonversion. Hierbei werden nicht nutzbare langwellige Photonen in kurzwellige Photonen umgewandelt. Diese lassen sich dann mit Standardsolarzellen nutzen. Außerdem entwickeln wir Solarzellen aus Quantenpunktmaterialien. Silicium-Quantenpunkte sind ein vielversprechendes Material für die Herstellung von Tandemsolarzellen auf Siliciumbasis, dessen Eigenschaften, z. B. die Bandlücke, sich für die Anwendung einstellen lassen. Weitere Konzepte sind u. a. Fluoreszenzkonzentratoren, Thermophotovoltaische Systeme und Solarzellen für die kabellose Energieübertragung mit Laserstrahlen.

Dr. Andreas Bett (links) und Dr. Frank Dimroth (rechts) wurden 2010 mehrfach für ihre Forschungsarbeiten an III-V Mehrfachsolarzellen für Konzentratormodule ausgezeichnet. 2009 erzielten sie mit ihrem Team für diese höchsteffizienten Solarzellen einen Wirkungsgrad von 41,1 Prozent (s. Beitrag S. 80). Damals ein Weltrekord, der u. a. mit dem Joseph-von-Fraunhofer Preis 2010 ausgezeichnet wurde.

ANSPRECHPARTNER

III-V Epitaxie, Solarzellen und Bauelemente	Dr. Frank Dimroth	Telefon +49 761 4588-5258 frank.dimroth@ise.fraunhofer.de
Farbstoff- und organische Solarzellen	Dr. Uli Würfel	Telefon +49 761 203-4796 uli.wuerfel@ise.fraunhofer.de
Konzentratorsysteme	M.Sc. Maike Wiesenfarth	Telefon +49 761 4588-5470 maike.wiesenfarth@ise.fraunhofer.de
Neuartige Solarzellenkonzepte und Photonenmanagement	Dr. Jan Christoph Goldschmidt	Telefon +49 761 4588-5475 jan.christoph.goldschmidt@ise.fraunhofer.de



ULTRA-DÜNNE MEHRFACHSOLARZELLEN AUS III-V VERBINDUNGSHALBLEITERN

Am Fraunhofer ISE haben wir Konzentrator-Solarzellen aus III-V Halbleitern mit Wirkungsgraden bis zu 41,1 % entwickelt. Auch im Weltraum finden diese komplexen Bauelemente ihren Einsatz zur Stromerzeugung für Satelliten. Wir entwickeln nun Mehrfachsolarmodule der nächsten Generation, die nur noch 10 µm dünn sind. Durch unsere Prozesse lassen sich teure Substrate recyceln, Kosten reduzieren und leichte sowie flexible Solarzellen für die Weltraumanwendung realisieren.

Frank Dimroth, Karen Dreyer, Stephanie Essig, Elvira Fehrenbacher, Tobias Gandy, Stefan Glunz, Martin Hermle, Vera Klinger, Ranka Koch, Harald Lautenschlager, Toni Leimenstoll, Eduard Oliva, Michael Schachtner, Felix Schätzle, Manuela Scheer, Gerald Siefer, Katrin Wagner, Andreas Wekkeli, Andreas Bett

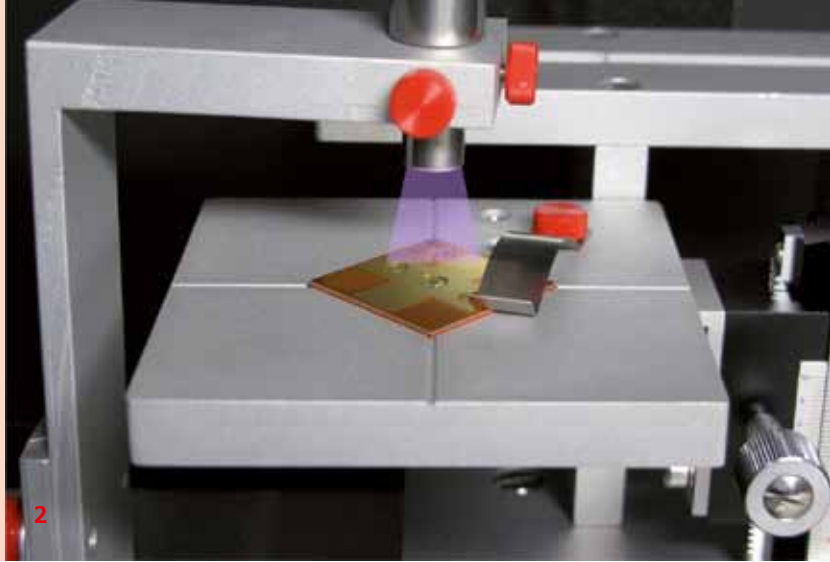
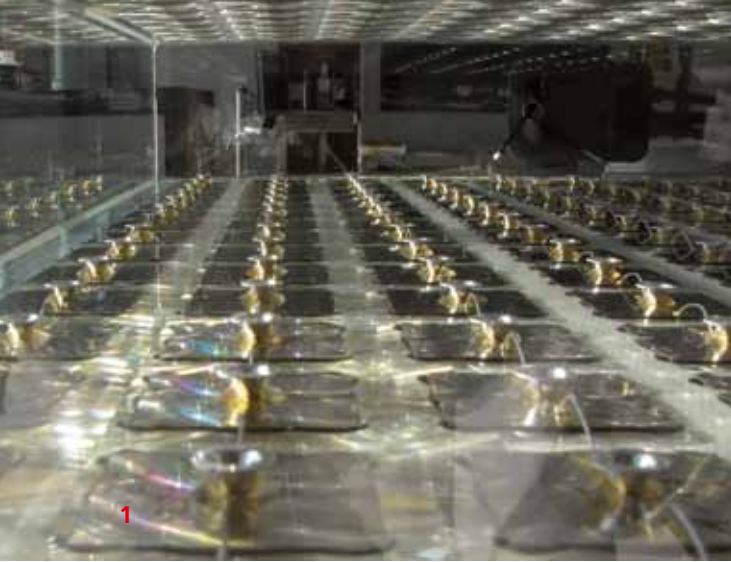
III-V Mehrfachsolarmodule sind sehr effizient, aber im Vergleich zu Si-Solarzellen teuer. Darum werden sie primär im Weltraum eingesetzt oder in terrestrischen PV-Konzentratorsystemen, in denen nur eine geringe Solarzellenfläche benötigt wird. Hier sind die III-V Solarzellen aufgrund ihres hohen Wirkungsgrads schon heute wettbewerbsfähig. Ein wesentlicher Anteil der Kosten entsteht durch das 150-300 µm dicke Substrat aus hochreinem Ge oder GaAs. Dieses dient als Basis für das Wachstum der vielen Halbleiterschichten, die das Licht in der Solarzelle absorbieren und in elektrischen Strom umwandeln. Wir arbeiten an Prozesstechnologien, bei denen die III-V Halbleiterschichten mit einer Dicke von nur 10 µm vom Substrat abgelöst werden. Das Substrat kann für weiteres Wachstum erneut eingesetzt werden. Hierdurch lässt sich der Bedarf von seltenen und teuren Materialien wie Ge oder GaAs signifikant verringern.

- 1 10 µm dünne Mehrfachsolarmodule der nächsten Generation.
- 2 Quanteneffizienz einer ersten GaInP/GaAs/Si Dreifachsolarmodule, die mittels Wafer-Bonding einer 6 µm dünnen Tandemzelle auf eine Si-Solarzelle hergestellt wurde.

Weiterhin bieten diese dünnen Mehrfachsolarmodule Vorteile in der Weltraumanwendung. Flexible und größere Solarmodule werden möglich, die sich wie eine Folie aufrollen lassen (Abb. 1). Die dünnen Zellen reduzieren das Gewicht des Satelliten und senken die Kosten für den Transport in den Weltraum. Gemeinsam mit der Firma AZUR Space Solar Power GmbH in Heilbronn arbeiten wir an solchen Zukunftskonzepten, entwickeln Herstellungsverfahren und testen die ultra-dünnen Mehrfachsolarmodule unter den harschen Einsatzbedingungen im Weltraum.

Die Ablösetechniken können weiterhin dazu genutzt werden III-V Mehrfachsolarmodule auf andere Substrate zu übertragen. So können ganz neue Bauelemente mit verbesserten Eigenschaften entstehen. Wir haben erste Solarzellen entwickelt, bei denen eine GaInP/GaAs-Tandemsolarmodule von dem GaAs-Substrat abgelöst und auf eine Si-Solarzelle übertragen wird. Dabei setzen wir das Verfahren des so genannten »Wafer-Bonding« ein. Die externe Quanteneffizienz der ersten Dreifachsolarmodule auf Si wird in Abb. 2 gezeigt. Die Zelle mit einer Fläche von 5,5 mm² erreicht einen Wirkungsgrad von 23,6 % unter 48fach konzentriertem Sonnenlicht. Wir arbeiten daran, dieses Konzept weiter zu entwickeln und die Wirkungsgrade zu erhöhen. So wollen wir die hohen Effizienzen der III-V Mehrfachsolarmodule in Zukunft mit der guten Verfügbarkeit und den geringen Kosten der Si-Solarzelle kombinieren. Hierzu bauen wir ein neues Labor für das »Wafer-Bonding« auf.

Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie die Europäische Weltraumbehörde ESA-ESTEC gefördert.



CONTEC – CONCENTRATOR TECHNOLOGY & EVALUATION CENTER

Im ConTEC arbeiten wir an hocheffizienten Konzentratormodulen der nächsten Generation. Wir entwickeln und optimieren automatisierte Fertigungsprozesse, die einen direkten Übertrag in eine kommerzielle Produktion ermöglichen. Da der hohe Energieeintrag der konzentrierten Solarstrahlung eine besondere Herausforderung darstellt, ist die Untersuchung der Module und Komponenten in Bezug auf Zuverlässigkeit ein weiterer Arbeitsschwerpunkt.

Theo Bonnet, Armin Bösch, Alexander Dilger, Tobias Dörsam, Fabian Eltermann, Henning Helmers, Joachim Jaus, Felix Jetter, Kerstin Röder, Fatih Sabuncuoglu, Gerald Siefer, Sandor Stecklum, Patrick Uhlig, Michael Passig, Gerhard Peharz, **Maïke Wiesenfarth**, Oliver Wolf, Christopher Zuckschwerdt, Andreas Bett

Im ConTEC stehen uns schnelle und präzise Anlagen zur Verfügung, wie sie auch in der industriellen Fertigung eingesetzt werden. Aktuell entwickeln wir einen automatisierten Fertigungsprozess für Solarzellenbaugruppen, die mit einer Optik versehen werden. Die Solarzellenbaugruppe inklusive Optik platzieren wir dann mit hoher Präzision auf einer Glas-Bodenplatte. Abb. 1 zeigt eine bestückte Bodenplatte mit Solarzellenbaugruppen und Sekundäroptiken in einem FLATCON®-Modul. Die Sekundäroptik hat in diesem Beispiel einen trichterförmigen Aufbau und eine reflektive Oberfläche. Durch das zusätzliche Bauteil wird der Akzeptanzwinkel des Konzentratormoduls erhöht, was den Jahresenergieertrag steigert. Für die Herstellung der Module wurden neue Fertigungskonzepte und neue Werkzeuge entwickelt. Die Bilderkennung der automatischen Prozesse wurde angepasst, da die Anforderungen durch die zusätzliche Optik steigen. Für unseren Industriekunden haben wir Bodenplatten gefertigt, die einer Leistung von einigen kWp entsprechen. Die kompletten Module werden nun im Feld getestet.

1 Innenansicht eines FLATCON®-Moduls mit Solarzellenbaugruppen und trichterförmiger Sekundäroptik.

2 Testplatz zur beschleunigten Alterung durch UV-Strahlung.

Ein weiterer Schwerpunkt des ConTEC ist die Entwicklung und die Untersuchung von Alterungseffekten in Konzentratormodulen und Modulkomponenten. Durch den extrem hohen Energieeintrag von teilweise über 100 W/cm^2 auf sehr kleine Flächen ist das thermische Management von entscheidender Bedeutung für zuverlässige und langlebige Module. Zur Auslegung führen wir thermische und thermo-mechanische Simulationen durch, die mit Außenmessungen verglichen werden. Um die Langzeitstabilität zu untersuchen folgen dann beschleunigte Alterungstests. Die Testbedingungen werden an die Modulparameter, die im realen Betrieb auftreten, angepasst, und zur Beschleunigung der Alterung physikalisch sinnvoll erhöht.

Eine besondere Herausforderung für die Konzentratormodule stellt die Belastung von Komponenten durch UV-Bestrahlung dar, weil durch die optische Konzentration hohe UV-Dosen generiert werden. Daher führen wir eine gesonderte Untersuchung von Konzentratorsolarzellen oder optischen Materialien durch. Hierzu haben wir einen Teststand aufgebaut (Abb. 2). Die Proben können mit der bis zu 6000fachen Energie der UV-A Strahlung des terrestrischen Sonnenspektrums (Referenz AM 1,5d ASTM G173-03) bestrahlt werden.

Unsere Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) und durch die Europäische Kommission, Concentrix Solar, Zenith Solar sowie weitere Industriepartner gefördert.



AUFSKALIERUNG VON FARBSTOFF- UND ORGANISCHEN SOLARZELLEN

Die Aufskalierung von Farbstoff- und organischen Solarzellen bringt eine Vielzahl von neuen wissenschaftlichen und technologischen Fragestellungen mit sich, die am Fraunhofer ISE intensiv bearbeitet werden.

Henning Brandt, Katarzyna Bialecka, Katrine Flarup-Jensen, **Andreas Hirsch**, Ramiro Loayza Aguirre, Hans-Frieder Schleiermacher, Welmoed Veurman, **Uli Würfel, Birger Zimmermann**, Stefan Glunz

Farbstoffsolarzellen sind elektrochemische Solarzellen und ähneln in ihrer Funktionsweise dem Primärprozess der Photosynthese. Sie lassen sich prinzipiell sehr einfach herstellen und sind ein Paradebeispiel für die Erforschung und Realisierung von funktionalisierten Nanomaterialien. Der höchste im Labor bisher erreichte solare Wirkungsgrad von Farbstoffsolarzellen liegt bei knapp zwölf Prozent.

Ein kommerziell sehr interessantes Geschäftsmodell für die Anwendung von Farbstoffsolarmodulen ist die gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV). Ziel ist daher die Entwicklung eines photovoltaisch aktiven Architekturglases, in dem dekorative Aspekte und ökologischer Nutzen bei einem geringen Mehrkostenaufwand in idealer Weise kombiniert werden.

Am Fraunhofer ISE wurde für diese Anwendung ein Modulkonzept entwickelt, das den Anforderungen und den Fabrikationsmethoden aus der Glasindustrie nahe kommt. Die Module werden vollständig in einem mehrstufigen Siebdruckverfahren hergestellt und anschließend in einem thermischen Verschmelzungsprozess (»Fusing«) langzeitstabil versiegelt. In Zusammenarbeit mit Projektpartnern wurden großflächige Modulprototypen hergestellt. Bevor Farbstoffsolarmodule auf Architekturglas in Serie produziert werden können, ist eine genaue Kontrolle der Fertigungsschritte erforderlich, um eine entsprechend hohe Produktlebensdauer garantieren zu können. Hierfür entwickeln wir spezifische Methoden der Qualitätssicherung für die Materialien und die Fertigungsprozesse.

1 *Erster komplett eingefärbter Prototyp eines 60 cm x 100 cm Farbstoffsolarmoduls, der am Fraunhofer ISE für den Einsatz in Architekturglas hergestellt wurde.*



In ausgedehnten Versuchsreihen gelang es, funktionsfähige Prototypen von großflächigen Farbstoffsolarmodulen auf Glas herzustellen. Es konnte weltweit erstmalig gezeigt werden, dass eine im Siebdruckverfahren integrierte Serienverschaltung der Module auf 60 cm x 100 cm großen Modulflächen möglich ist. Eine externe Verschaltung von Submodulen entfällt. Damit ist eine wesentliche Voraussetzung für die kostengünstige Aufskalierung geschaffen.

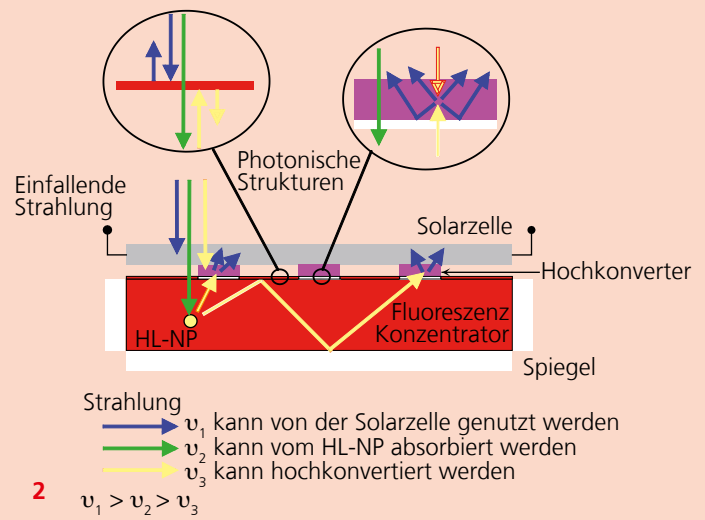
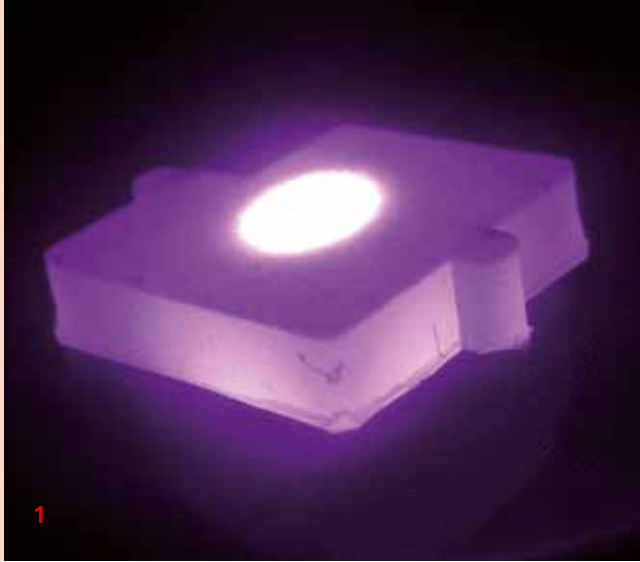
Organische Solarzellen bieten ein großes Potenzial, sehr kostengünstig produziert zu werden. Dies begründet sich in der Möglichkeit, organische Solarzellen im so genannten Rolle-zu-Rolle Verfahren auf flexiblen Endlossubstraten mit großer Geschwindigkeit herzustellen. Dabei werden die Herstellungskosten fast ausschließlich von den Kosten für die eingesetzten Materialien bestimmt, so dass jede Einsparung bei den Materialien eins zu eins die Modulkosten reduziert.

Ein Schwerpunkt unserer Arbeiten ist daher der Ersatz des teuren Indium-Zinn-Oxid (ITO) Superstrats. Hierzu werden verschiedene Ansätze verfolgt. Ein Ansatz ist die Verwendung einer < 10 nm dünnen Silberschicht, die zwischen halbleitende Oxide eingebettet ist. Damit wurden auf kleinen Flächen bereits organische Solarzellen hergestellt, die die gleiche Effizienz wie solche mit ITO-Elektrode erreichten. Darüber hinaus wurde ein Substrataufbau entwickelt, basierend auf einer reflektierend metallisierten Folie, auf der die Solarzelle prozessiert wird. Die zweite Elektrode besteht in diesem Aufbau aus einer transparenten, leitfähigen Polymerschicht. Diese wiederum

2 Vorversuche zur Beschichtung auf einer Produktionstiefdruckanlage mit Farben ohne photovoltaische Funktion. Die Versuche dienen zur Feststellung der Passgenauigkeit beim Druck auf bereits vorhandene Strukturen, um die technischen Randbedingungen für neue organische Modulkonzepte zu ermitteln.

wird entweder mit einem Metallgrid kombiniert oder alternativ auf die Rückseite durchkontaktiert, wo sich eine zweite vollflächige Metallisierung befindet. Basierend auf dem Substratkonzept mit Polymer/Grid-Elektrode werden am Fraunhofer ISE bereits auf Flächen von einigen Quadratzentimetern mit Rolle-zu-Rolle kompatiblen Beschichtungsverfahren ITO-freie flexible organische Solarzellenmodule hergestellt. Ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Aufskalierung ist die Strukturierung der verschiedenen Schichten. Wir arbeiten an Verfahren, die an die speziellen Eigenschaften der jeweiligen Schichten und die entsprechenden Qualitätsanforderungen angepasst sind. Ein Beispiel sind die sich bei der Z-Verschaltung einstellenden Kontaktwiderstände. Der nächste Schritt ist die Übertragung der sehr guten Laborergebnisse auf eine Rolle-zu-Rolle Beschichtungsanlage. Eine solche industriell kompatible Anlage wird zur Zeit als strategische Investition beschafft.

Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das Umweltministerium Baden-Württemberg und die Europäische Kommission unterstützt.



HOCHKONVERSION – NIEDERENERGETISCHE PHOTONEN NUTZBAR MACHEN

Rund 20 % der eingestrahnten Solarenergie gehen verloren, weil Si-Solarzellen Photonen mit Energien unterhalb der Bandlücke des Siliciums nicht nutzen können. Durch Hochkonversion können diese Photonen nutzbar gemacht werden. Dabei werden mindestens zwei Photonen mit zu kleiner Energie in ein nutzbares Photon umgewandelt. Um die Effizienz dieses Prozesses zu steigern, untersuchen wir mehrere Konzepte: Durch die Kombination mit einem zweiten lumineszenten Material lässt sich der ausgenutzte Spektralbereich deutlich verbreitern, durch die Kombination mit Metall-Nanopartikeln lässt sich die Effizienz des Hochkonversionsprozesses steigern.

Stefan Fischer, Jan Christoph Goldschmidt, Martin Hermle, Barbara Herter, Heiko Steinkemper, Tim Rist, Stefan Glunz

Erbium ist ein sehr effizientes Hochkonversionsmaterial, wenn es in geeignete Wirtskristalle, z. B. NaYF_4 , eingebettet ist. Mit einem solchen an der Universität Bern hergestellten Material ist es am Fraunhofer ISE erstmals gelungen, einen messbaren Beitrag zum Kurzschlussstrom einer Si-Solarzelle unter Anregung mit einem breiten Spektrum nachzuweisen.

Ein Nachteil des Erbiums ist, dass es nur einen sehr schmalen Absorptionsbereich hat. Die Anzahl der hochkonvertierten Photonen lässt sich deshalb deutlich steigern, wenn das Erbium mit einem zweiten lumineszenten Material kombiniert wird. Dieses Material soll eine breite Absorption haben und im Absorptionsbereich des Erbiums emittieren. Hierfür bieten sich z. B. lumineszente Halbleiter-Nanopartikel (HL-NP) aus Blei-Selenid an.

Abb. 2 zeigt ein fortgeschrittenes Systemdesign für die Realisierung eines solchen Konzepts. Der Hochkonverter befindet sich hinter einer bifazialen Si-Solarzelle. Die Photonen

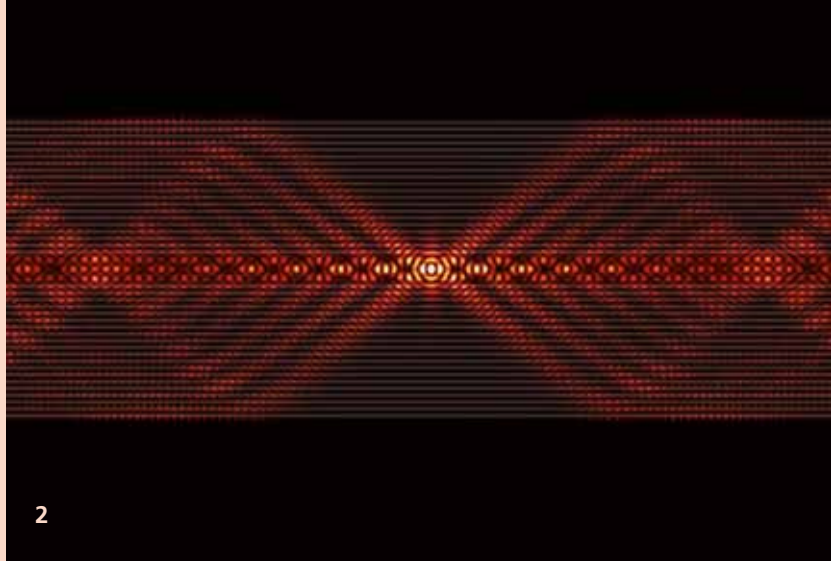
1 Hochkonverter, der unter Beleuchtung mit unsichtbarer Infrarot-Strahlung hell im Sichtbaren leuchtet.

2 Fortgeschrittenes Systemdesign für die Kombination eines Hochkonverters mit einem zweiten lumineszenten Material.

mit Energien unterhalb der Bandlücke werden durch die Solarzelle transmittiert. Das zweite lumineszente Material (HL-NP) ist in einem Fluoreszenzkonzentrator integriert. Hiermit wird Strahlung auf den Hochkonverter konzentriert. Weil die Hochkonversion ein nicht-linearer Prozess ist, steigt dadurch die Effizienz des Hochkonversionsprozesses. Spektral selektive photonische Strukturen sorgen dafür, dass Licht aus den unterschiedlichen Spektralbereichen jeweils in den Teil des Systems geleitet wird, in dem es am effizientesten ausgenutzt wird. Zusammen mit Projektpartnern arbeiten wir daran, ein System mit allen beschriebenen Komponenten zu realisieren und zu optimieren.

Ein weiterer Ansatz ist die Ausnutzung von Plasmonenresonanz in Metall-Nanopartikeln zur Steigerung der Hochkonversionseffizienz. Die Plasmonenresonanz führt dazu, dass in der Nähe von Metall-Nanopartikeln starke Feld-Überhöhungen auftreten. Dies lässt sich aufgrund der Nichtlinearität der Hochkonversion zur Effizienzsteigerung ausnutzen. Außerdem werden die einzelnen strahlenden Übergänge des Hochkonverters beeinflusst. Erste Simulationen, die ein Ratengleichungsmodell der Hochkonversion mit Mie-Theorie-Rechnungen der RWTH Aachen kombinieren, zeigen dabei eine deutliche Erhöhung der Hochkonversionseffizienz.

Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und die Europäische Union unterstützt.



MIT FLUORESZENZKONZENTRATOREN DIFFUSES LICHT KONZENTRIEREN

Fluoreszenzkonzentratoren können sowohl direkte Solarstrahlung als auch diffuses Licht konzentrieren. Sie sind besonders für den Einsatz in Innenräumen und aufgrund ihrer Ästhetik auch für gebäudeintegrierte Anwendungen interessant. Für den kommerziellen Einsatz muss die Effizienz weiter gesteigert werden. Dies gelingt mit photonischen Strukturen, welche die Lichtleitung verbessern. Spezielle infrarot-aktive Halbleiter-Nanopartikel dehnen den ausgenutzten Spektralbereich ins Infrarote aus.

Benedikt Bläsi, **Jan Christoph Goldschmidt**,
Johannes Gutmann, Martin Hermle, Marius Peters,
Janina Posdziech, Tim Rist, Stefan Glunz

Die Farbstoffe in Fluoreszenzkonzentratoren absorbieren einfallendes Licht in einem bestimmten Spektralbereich. Sie emittieren kurz darauf Licht schmalbandig mit einer größeren Wellenlänge. Ein Teil dieses Lichts wird durch Totalreflexion zu den Kanten der Konzentratoren geleitet. Der Anteil des gesammelten Lichts lässt sich durch so genannte spektral selektive photonische Strukturen vergrößern. Sie lassen das Licht im Absorptionsbereich passieren und reflektieren das emittierte Licht. Dadurch gelangt fast alles emittierte Licht zu den Kanten. Experimentell konnte eine Erhöhung der Lichtleiteffizienz um 20 % gezeigt werden. Im Moment werden als photonische Strukturen komplexe Schichtstapel verwendet. Diese sind noch teuer in der Herstellung, deshalb entwickeln wir kostengünstige Alternativen. Eine Möglichkeit ist die Herstellung so genannter Opalfilme. Hierbei ordnen sich in einem selbstorganisierten Prozess monodisperse PMMA-Kugeln von einigen 100 nm Durchmesser zu kristallähnlichen Strukturen an.

Um die Effizienz der Lichtleitung weiter zu erhöhen, untersuchen wir außerdem die Einbettung der Farbstoffe direkt in

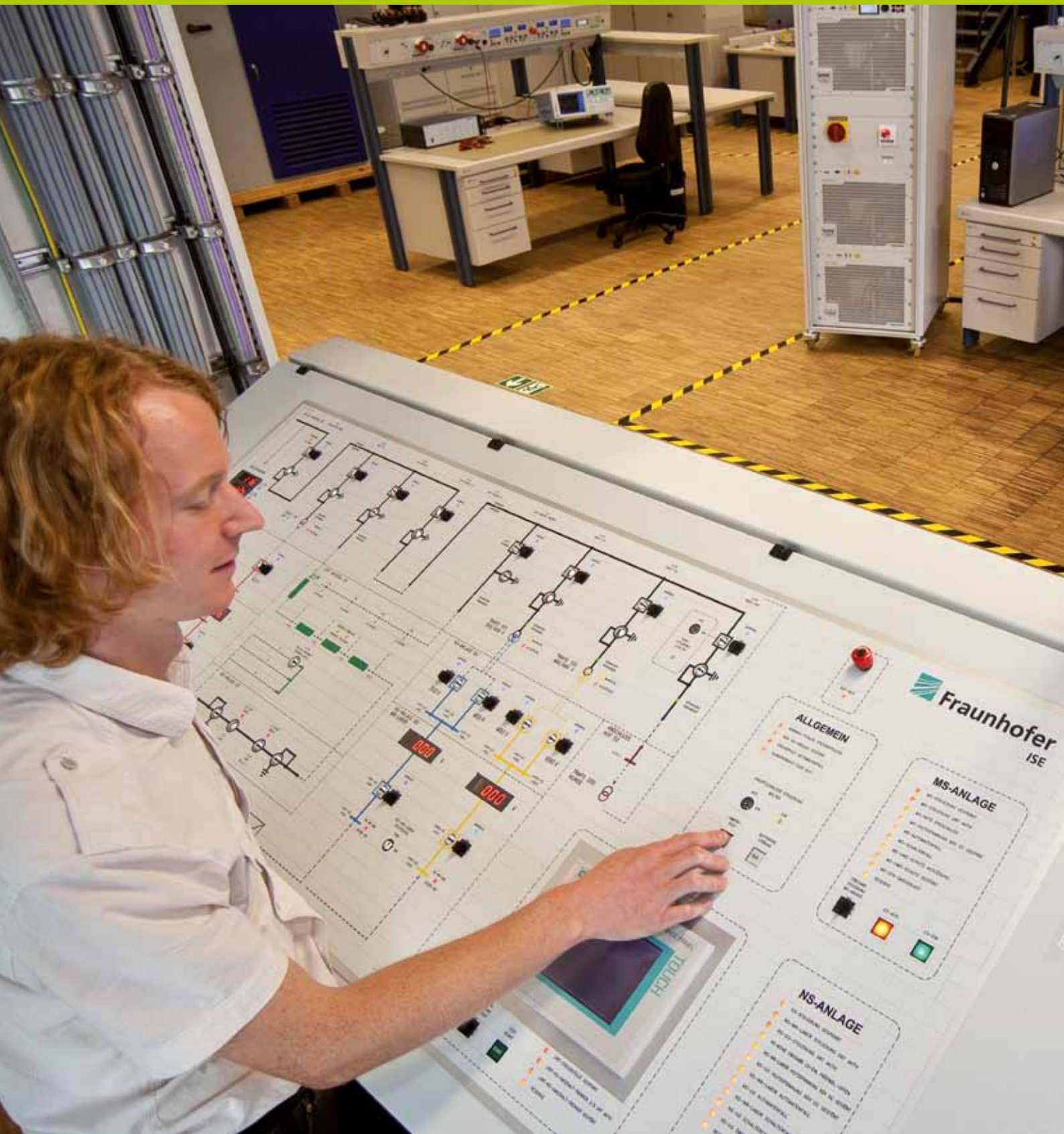
- 1 *Fluoreszenzkonzentratoren mit unterschiedlichen Farbstoffen.*
- 2 *Effiziente Lichtleitung von einem Emitter (Bildmitte) innerhalb einer photonischen Struktur hin zu den Kanten. Zu sehen ist die mittels FDTD simulierte Intensitätsverteilung des emittierten Lichts.*

photonische Strukturen (Abb. 2). Zum einen können dünne Schichten, die den Farbstoff enthalten, in den photonischen Schichtstapel integriert werden, zum anderen die beschriebenen Opalfilme aus Kugeln hergestellt werden, die bereits Farbstoffmoleküle enthalten. Um optimale Systemdesigns zu finden, werden die Eigenschaften der jeweiligen Systeme durch die Kombination unterschiedlicher Simulationswerkzeuge untersucht. Dazu zählen Transfer-Matrix-Ansätze, Finite Difference Time Domain (FDTD) und Rigorous Coupled Wave Analysis (RCWA).

Die eingesetzten organischen Farbstoffe weisen eine hohe Quanteneffizienz des Absorptions- und Emissionsvorgangs auf. Allerdings nutzen sie jeweils nur einen schmalen Spektralbereich aus. Man kombiniert mehrere Fluoreszenzkonzentratoren mit unterschiedlichen Farbstoffen, um eine breitere Abdeckung des Sonnenspektrums zu erreichen. Durch eine solche Kombination und die Verwendung von spektral angepassten Solarzellen konnte am Fraunhofer ISE ein sehr hoher Systemwirkungsgrad von 6,9 % erreicht werden. In ihrem aktiven Bereich leiten die Fluoreszenzkonzentratoren dabei über 60 % der einfallenden Strahlung an die Kanten. Die stärkste Begrenzung des Systemwirkungsgrads ist darin begründet, dass es keine organischen Farbstoffe gibt, die mit hoher Quanteneffizienz im Infraroten (IR) aktiv sind. Deshalb entwickeln wir mit Partnern IR-aktive Fluoreszenzkonzentratoren. Hierfür werden lumineszente Halbleiter-Nanopartikel, z. B. aus Blei-Selenid oder Blei-Sulfid, verwendet.

Die Arbeiten werden durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und durch die Fraunhofer-Gesellschaft gefördert.

STROMVERSORGUNG EFFIZIENT



REGENERATIVE STROMVERSORGUNG

Rund zwei Milliarden Menschen in ländlichen Regionen, unzählige technische Anlagen in der Telekommunikation, Umweltmesstechnik sowie vier Milliarden tragbare Elektronikgeräte haben eines gemeinsam: Sie alle brauchen eine netzunabhängige Stromversorgung. Hierfür werden zunehmend regenerative Energien bzw. innovative Energiewandler eingesetzt. Rund fünf Prozent der weltweit verkauften Photovoltaikmodule gehen in diese Märkte, die sich zum Teil bereits ohne Fördermittel ökonomisch selbst tragen. Zudem gibt es einen riesigen Markt für Technologien zur dezentralen Wasserentsalzung und -entkeimung auf der Basis von erneuerbaren Energien. Für dieses breite Anwendungsspektrum entwickeln wir Konzepte, Komponenten und Systeme zur autonomen Stromversorgung auf der Basis von Photovoltaik, Brennstoffzellen, Wind- und Wasserkraft. Besondere Bedeutung kommt dabei elektrischen Speichern wie Batterien zu, die in fast allen Anwendungen enthalten sind. Dies gilt in zunehmendem Maße auch für netzgekoppelte Energiesysteme, in denen stationäre oder mobile elektrische Speicher die Fluktuationen in der Wind- und Solarstromerzeugung dämpfen können. Wir arbeiten deshalb intensiv an der Entwicklung und Optimierung von Batteriesystemen für stationäre und mobile Anwendungen (Elektrofahrzeuge). Schwerpunkte sind dabei die Erhöhung der Leistungs- und Speicherkapazität, verbesserte Betriebsführungsstrategien und die Entwicklung von Batteriemanagementsystemen für alle gängigen Technologien.

Der Zubau netzgekoppelter Photovoltaikanlagen ist in den letzten Jahren enorm angestiegen. Um dieses Wachstum auch weiterhin zu sichern, müssen bei sinkender Förderrate auch die Kosten für die Systemtechnik kontinuierlich gesenkt werden. Dies gilt insbesondere für Wechselrichter zur Netzeinspeisung, einem Produktbereich, in dem deutsche Hersteller nach wie vor den Markt dominieren. Neue Schaltungskonzepte, digitale Regelungstechnik, Fortschritte bei Leistungshalbleitern sowie bei passiven Bauelementen bieten aber noch erhebliches Potenzial zur Effizienzsteigerung und Kostensenkung. Hierfür bieten wir für das gesamte Leistungsspektrum bis in den Megawatt-Bereich spezifisches Know-how an, insbesondere in den Bereichen Schaltungsdesign sowie Dimensionierung und Implementierung von analogen und digitalen Reglern.

Darüberhinaus führen wir für unsere Kunden alle in den neuen Netzanschluss-Richtlinien geforderten Tests an Umrichtern mit Nennleistungen bis über 1 MW durch.

Zur Qualitätssicherung und Betriebsüberwachung von Photovoltaikanlagen und zur Charakterisierung von Photovoltaikmodulen bieten wir ein breites Dienstleistungsspektrum, das sowohl Ertragsgutachten, Anlagenabnahmen und Monitoringkonzepte für große Anlagen als auch Präzisionsmessungen von Modulen umfasst. Unsere Photovoltaik-Kalibrierlabore (CalLab PV Cells und CalLab PV Modules) zählen zu den führenden Labors weltweit.

Ob Photovoltaik, Wind- und Wasserkraft oder Blockheizkraftwerke: Alleine in Deutschland speisen bereits heute zehntausende dezentrale Erzeugungsanlagen ihren Strom in die Verteilnetze ein. Um den zukünftig zu erwartenden enormen Steigerungen und den damit verbundenen technischen, ökologischen und ökonomischen Anforderungen gerecht zu werden, entwickeln wir neue Konzepte und Komponenten für das Energiemanagement von dezentralen Erzeugern und Verbrauchern im Verteilnetz auf Basis modernster Kommunikationstechnologie. Das Einbeziehen der Stromkunden über Nutzungsverhalten, Verbrauchsvisualisierung und effiziente Abrechnungsmethoden (Smart Metering) spielt dabei eine zunehmend wichtigere Rolle.

Bundesregierung, Industrie und Wissenschaft messen der Elektromobilität basierend auf Fahrzeugen, die teil- bzw. vollelektrische Antriebe besitzen und ihre Energie aus dem Stromnetz beziehen (Elektro- und Plug-In-Fahrzeuge), eine besondere Bedeutung zur Erreichung der gesteckten Umweltziele bei. Das Fraunhofer ISE arbeitet an der Schnittstelle zwischen Fahrzeug und Stromnetz an Konzepten für eine umweltverträgliche Energieversorgung, einer optimalen Einbindung der Fahrzeuge in das Stromnetz und entwickelt zusammen mit Partnern aus der Automobil- und Versorgungsindustrie Komponenten für das Energiemanagement und für die bidirektionale Energieübertragung zwischen Fahrzeug und Netz sowie universelle Metering- und Abrechnungssysteme.



Für die solare Stromerzeugung im größeren Maßstab und vorzugsweise für den Einsatz in südlichen Ländern arbeitet das Fraunhofer ISE an Technologien für solarthermische Kraftwerke.

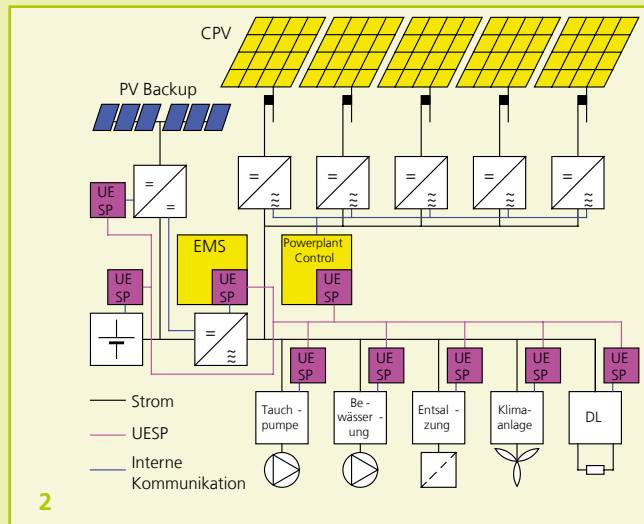
Unsere Laborausstattung für das Geschäftsfeld »Regenerative Stromversorgung« im Überblick:

- Leistungselektroniklabor mit modernster Geräte- und Softwareausstattung für Leistungen bis 1 MW
- Labor zur Zertifizierung von Wechselrichtern (Fault-Ride-Through, Wirkungsgradmessung, Power Quality etc.)
- Entwicklungsumgebungen für Mikrocontroller, digitale Signalprozessoren (DSP) und Embedded Systems
- Messlabor für elektromagnetische Verträglichkeit (EMV)
- Labor für IuK-Technologien
- Smart Metering-Labor
- Mess- und Kalibrierlabor für Solarmodule
- Freiland-Testfeld zur Erprobung von Solarkomponenten
- Batterielabor für Entwicklung und Tests vom Kleinleistungs- bis zum Automotive-Bereich
- Lichtlabor
- Teststände für Brennstoffzellen im Betrieb mit Wasserstoff und Methanol
- ortsaufgelöste Charakterisierung von Brennstoffzellen
- Test- und Entwicklungslabor für Trinkwasseraufbereitungssysteme

Über die Schaltzentrale des neuen Megawattlabors am Fraunhofer ISE können wir manuell oder automatisiert Schalthandlungen auf der Nieder- und auf der 20kV-Mittelspannungsebene durchführen. Dies ermöglicht den Betrieb und die Prüfung von großen Solarwechselrichtern bis zu einer Leistung von einem Megawatt.

ANSPRECHPARTNER

Autarke Stromversorgungen und Inselnetze	Dr. Matthias Vetter	Telefon +49 761 4588-5600 matthias.vetter@ise.fraunhofer.de
Dezentrale, netzgekoppelte Energiesysteme (Smart Grids)	Dr. Christof Wittwer	Telefon +49 761 4588-5115 christof.wittwer@ise.fraunhofer.de
	Dr. Thomas Erge	Telefon +49 761 4588-5337 thomas.erge@ise.fraunhofer.de
Qualitätssicherung von PV-Modulen und -Systemen	Dipl.-Ing. Klaus Kiefer	Telefon +49 761 4588-5218 klaus.kiefer@ise.fraunhofer.de
Leistungselektronik und Regelungstechnik	Prof. Dr. Bruno Burger	Telefon +49 761 4588-5237 bruno.burger@ise.fraunhofer.de
Elektrische Speichersysteme	Dr. Matthias Vetter	Telefon +49 761 4588-5600 matthias.vetter@ise.fraunhofer.de
Solare Kraftwerke	Dr. Werner Platzer	Telefon +49 761 4588-5983 werner.platzer@ise.fraunhofer.de
Dezentrale Wasseraufbereitung	Dipl.-Ing. Joachim Koschikowski	Telefon +49 761 4588-5294 joachim.koschikowski@ise.fraunhofer.de
	Dipl.-Ing. Joachim Went	Telefon +49 761 4588-5240 joachim.went@ise.fraunhofer.de
Elektromobilität	Dr. Günther Ebert	Telefon +49 761 4588-5229 guenther.ebert@ise.fraunhofer.de



CPV-INSELSYSTEM ZUR WASSER-VERSORGUNG IN ÄGYPTEN

Im Rahmen des von der EU geförderten Projekts »NACIR« haben wir eine autarke Systemlösung auf Basis konzentrierender Photovoltaik (CPV) entwickelt und in Ägypten aufgebaut. Das System stellt die elektrische Energie zur Wasserförderung, Entsalzung und Bewässerung bereit. Kern der Entwicklungsarbeiten ist ein intelligentes Energiemanagementsystem EMS. Es sorgt für eine maximale direkte Nutzung der zur Verfügung stehenden Solarenergie, reduziert somit die Zwischenspeicherung in den Batterien auf ein Minimum und senkt folglich deutlich die Kosten für den zu installierenden Energiespeicher.

Binod Prasad Koirala, Alexander Schies, **Matthias Vetter**, Jakob Wachtel, Joachim Went, Günther Ebert

Der Zugang zur Ressource Wasser als Trinkwasser oder zur Bewässerung wird in vielen Regionen der Welt immer kritischer, besonders in ariden Gegenden, ländlichen Regionen, mit schlechter Infrastruktur. Neben Pumpsystemen mangelt es häufig an einer ausreichenden Energieversorgung. Deshalb werden oft in den Anschaffungskosten günstige aber in den Betriebs- und Wartungskosten teure Dieselgeneratoren eingesetzt. In den meisten Anwendungen sind dagegen PV-Inselsysteme heute trotz höherer Investitionskosten über die Lebensdauer kosteneffizienter. Eine Möglichkeit, die Anschaffungskosten deutlich zu verringern, besteht in der Reduzierung oder dem gänzlichen Verzicht auf einen elektrischen Speicher und der direkten Nutzung der tagsüber zur Verfügung stehenden Solarenergie.

Voraussetzung hierfür ist eine intelligente Systemauslegung und ein ausgefeiltes Energiemanagementsystem. Um dies zu erreichen, haben wir eine umfangreiche Modellbibliothek mit unterschiedlichsten Verbrauchern, Erzeugern, Speichern und Energiewandlern in der Modellumgebung Dymola entwickelt.

1 CPV-Inselsystem in Wadi El Natroon, 100 km nordwestlich von Kairo (Ägypten): 5 CPV-Tracker mit je 6 kWp.

2 Schema des NACIR CPV-Inselsystems. Jede Komponente ist über das Universal Energy Supply Protokoll (UESP) mit dem Energiemanagementsystem (EMS) verbunden.

Mit diesen Modellen werden Systeme ausgelegt, simuliert und optimiert. So können Energiemanagement-Algorithmen im Rahmen von Simulationsstudien entwickelt und optimiert werden, bevor sie in den bestehenden Labors des Fraunhofer ISE validiert werden. Die so entwickelten Algorithmen werden dann in Feldanlagen übertragen, z. B. nach Ägypten.

Für das Projekt »NACIR« entwickelten wir zunächst einen nach Prioritäten gesteuerten Algorithmus, der Lasten entsprechend der aktuell verfügbaren Solarenergie zu- und abschaltet oder entsprechend dem solaren Energieangebot nachregelt. Dadurch kann die verfügbare Energie direkt an die Lasten geführt werden und der Speicher bleibt unbelastet. In den Labors wird zurzeit ein neuer Algorithmus getestet, der Wetterprognosen errechnet. Diese dienen einer Fahrplanerstellung der Lasten am folgenden Tag, speziell entwickelte Algorithmen führen eine Prioritäts- und Energieausnutzungsoptimierung durch. So kann die Effizienz des Systems weiter gesteigert werden. Als Kommunikationsinfrastruktur wurde für das System das am Fraunhofer ISE entwickelte Universal Energy Supply Protocol (UESP) verwendet. Es ermöglicht eine Kommunikation mit allen Komponenten des Systems über Herstellergrenzen hinweg. Mit dem UESP-Protokoll soll eine einfache Systemerweiterung mit dem bestehendem EMS erreicht werden, in Zukunft können so »Plug and Play«-fähige Inselsysteme entstehen. Solche kostenoptimierte PV-Inselsysteme helfen, abgelegene Gebiete kosteneffizient und nachhaltig zu elektrifizieren. Neben der Entwicklung optimierter Systeme findet begleitend zu Feldaufbauten ein Wissenstransfer durch spezielle Schulung der Verantwortlichen vor Ort statt.



ENTWICKLUNG VON TESTMETHODEN UND UNTERSUCHUNGEN AN PV-LEUCHTEN

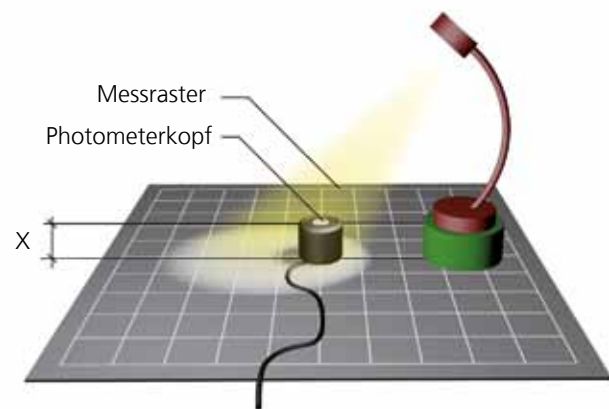
Das Fraunhofer ISE wurde von der Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) und der Weltbank/IFC beauftragt, Testmethoden für die Prüfung von photovoltaisch versorgten Leuchten zu entwickeln und umfangreiche Tests an solchen Leuchten durchzuführen. Insgesamt wurden 30 verschiedene Leuchtentypen mit mehr als 100 Testexemplaren untersucht und bewertet.

Georg Bopp, Stephan Lux, Markus Müller, **Norbert Pfanner**, Michael Strasser, Christian Wiczorek, Günther Ebert

1,6 Mrd. Menschen haben derzeit keinen Zugang zur Stromversorgung. Als Beleuchtungssysteme werden daher in ländlichen Regionen häufig Petroleumlampen eingesetzt. Die Betriebskosten dieser Leuchten sind für sehr arme Haushalte oft der größte Ausgabenposten. Hier stellen kleine photovoltaisch betriebene Leuchten eine umweltfreundliche und kostengünstige Alternative dar. Jedoch zeigten Untersuchungen, dass marktverfügbare PV-versorgte Leuchten deutliche Unterschiede in ihrer Qualität aufweisen. In einem ersten Schritt haben wir daher am Fraunhofer ISE Testmethoden zur Verifizierung der Qualität von PV-Leuchten entwickelt. Diese wurden speziell an die finanziellen und technischen Möglichkeiten von Testlabors in Entwicklungs- und Schwellenländern angepasst. Die Testmethoden umfassen die Bereiche Beleuchtungsservice, Gebrauchstauglichkeit und Strapazierfähigkeit. Im Test auf Gebrauchstauglichkeit werden Leuchtdauer, Ladeverhalten und Handhabbarkeit überprüft, mit Hilfe von Fall- und Belastungstests der Steckverbindungen und Schalter die Strapazierfähigkeit der Leuchten. Ein Dauertest bringt Aufschluss über die Langzeitstabilität der verwendeten Lichtquellen.

Mehr als 30 verschiedene PV-Leuchten haben wir in unserem Lichtlabor nach den entwickelten Testmethoden untersucht und bewertet. Im Zuge der Messungen und Tests wurden die Methoden verfeinert und in Zusammenarbeit mit einem exter-

- 1 *Hauptanwendung für kleine photovoltaisch betriebene Lampen: Lesen nach Sonnenuntergang.*
- 2 *Zwei Beispiele der am Fraunhofer ISE getesteten Leuchten.*



$X = \text{Höhe Photometer} = \text{Höhe Abstandhalter}$

- 3 *Am Fraunhofer ISE entwickelter Testaufbau zur kostengünstigen Prüfung der Beleuchtungsstärke von Leseleuchten.*

nen Labor in China (National Lighting Test Centre) hinsichtlich der Anwendbarkeit und Kosten optimiert. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigten teilweise erhebliche Mängel im Bereich der Elektronik, Bauteilqualität, Einhaltung von Nenngrößen, Mechanik, Beleuchtungsqualität und Lebensdauer. Auffallend waren auch große Exemplarstreuungen bei den bis zu sechs untersuchten Prüflingen pro Leuchtentyp.

Die Arbeiten wurden durch die Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ) und die Weltbank-Gruppe gefördert.



© badenova

INTELLIGENTE VERMARKTUNG VON STROM AUS DEZENTRALEN ENERGIEQUELLEN

Dezentrale und erneuerbare Energieerzeuger müssen zukünftig auch in die Europäischen Märkte für Strom sowie die Betriebsführung der Stromnetze integriert werden. In einem Europäischen Forschungsprojekt haben wir Lösungen zur intelligenten Vermarktung von Strom und weiterer Dienstleistungen solcher Erzeuger erarbeitet, die heute und in naher Zukunft relevant sind.

Thomas Erge, Christian Sauer, Christof Wittwer, Günther Ebert

Im Forschungsprojekt »Market Access for Smaller Size Intelligent Electricity Generation (MASSIG)« untersuchten wir gemeinsam mit Projektpartnern, wie Strom aus dezentralen und umweltfreundlichen Erzeugern bedarfsgerecht und kostendeckend am liberalisierten Strommarkt bereitgestellt und vermarktet werden kann. Die zentrale Frage hierbei war: Wie können kleine und mittlere Stromerzeuger (bis einige MW) in große Märkte eintreten? Das Projektteam wählte exemplarisch die Zielländer Dänemark, Deutschland, Großbritannien und Polen aus. Unter Berücksichtigung der gesetzlichen, regulatorischen und technischen Rahmenbedingungen und Anforderungen wurden die länderspezifischen Marktchancen – mittels Gewinn- und Verlustberechnungen – analysiert und aus den Ergebnissen Maßnahmen für einen erfolgreichen Markteintritt abgeleitet. Eine Grunderkenntnis des Projekts lautet: Insbesondere wenn sich mehrere regional verteilte Stromerzeuger zusammenschließen und intelligente Stromprodukte am Markt anbieten, können sie gegenüber großen konventionellen Anbietern durchaus konkurrenzfähig sein.

Ein Schlüssel hierfür ist neben der reinen Stromlieferung auch das Angebot zusätzlicher Dienstleistungen. Z. B. benötigen die Netzbetreiber zur Kompensation ungeplanter und kurzfristiger Ungleichgewichte im Stromnetz verschiedene Arten so

1 *Innenansicht des BHKW Friesenheim. Die Anlage der badenova WÄRMEPLUS ist eines der im EU-Projekt »MASSIG« ausgearbeiteten Fallbeispiele.*

genannter Regelenergie, die sie über transparente Märkte und Handelsprozesse beschaffen müssen. Weitere Beispiele für Dienstleistungen sind die Begrenzung von Spitzenlasten im Stromnetz oder Maßnahmen zur Spannungshaltung in lokalen Stromnetzabschnitten (z. B. durch Einspeisung von Blindleistung). Auch dezentrale und alternative Stromversorger können bei intelligenter Betriebsführung zu solchen Produkten beitragen und hiervon profitieren.

Zu den sieben europäischen Projektpartnern zählte badenova WÄRMEPLUS. Die Tochterfirma des regionalen Energieversorgers badenova betreibt Blockheizkraftwerke (BHKW) und beliefert Zehntausende von Kunden in Südwestdeutschland mit Wärme und Kälte. Gemeinsam mit diesem Industriepartner wurde ein Konzept erarbeitet, das auch nach Auslaufen der Förderung gemäß Kraft-Wärme-Kopplungsgesetz (KWKG) einen rentablen Betrieb der BHKW ermöglicht. In der konkreten Umsetzung bedeutet dies, dass badenova WÄRMEPLUS zukünftig einerseits Strom am Markt vertreiben wird und gleichzeitig Regelenergieprodukte für den Abruf durch die Netzbetreiber anbietet. Die Projektarbeit hat badenova WÄRMEPLUS vielversprechende Lösungsansätze aufgezeigt. Deutlich wurde, dass sich die Stromerzeugung in Kraft-Wärme-Kopplung auch unter den aktuell schwieriger gewordenen Bedingungen weiterhin auszahlen kann, wenn intelligente Vermarktungsstrategien umgesetzt werden.

Das Projekt wurde durch die Europäische Kommission im Programm »Intelligent Energy Europe« gefördert. Projektpartner waren die badenova WÄRMEPLUS, EMD, EREC sowie die Universitäten Lodz, Manchester und Wien.



SMART ENERGY LAB FÜR THERMISCHE UND ELEKTRISCHE GEBÄUDEENERGIESYSTEME

Die Integration regenerativer Erzeugungstechnologien erfordert Energiemanagementkonzepte und -lösungen, die im zukünftigen intelligent vernetzten Smart Home ansetzen. Das Smart Energy Lab am Fraunhofer ISE bietet eine ideale Plattform für die Entwicklung und Evaluation von Energiemanagementlösungen einschließlich der hierfür eingesetzten Informations- und Kommunikationstechnologien.

Dennis Freiberger, **Bernhard Wille-Hausmann**,
Christof Wittwer, Günther Ebert

Mit seiner langjährigen systemtechnischen Erfahrung ist das Fraunhofer ISE idealer Ansprechpartner für intelligente Energiesysteme im Verteilnetz. 2010 hat das Institut das hochmoderne Smart Energy Lab in Betrieb genommen. Dieses Testlabor verfügt über eine vollständige Ausstattung von regenerativen und effizienten sowohl elektrischen als auch thermischen Erzeugern und Speichern zukünftiger Ein- und Mehrfamilienhäuser. Mit der Abbildung und Vernetzung aller Energieflüsse bietet das Labor eine einzigartige Plattform für die Analyse, Bewertung und Entwicklung von Smart Homes und Smart Grid-Technologien.

Das Smart Energy Lab verfügt u. a. über eine inselfähige 5 kW Kraft-Wärme-Kopplungs-Anlage (KWK), einen 2 m³ großen Schichtenpufferspeicher, einen PV-Simulator, mehrere PV-Wechselrichter sowie diverse Inselwechselrichter, einen Lithium-Ionen-Speicher (7,5 kWh), eine Bleibatteriebank (15 kWh) und eine Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge. IT-seitig werden alle Komponenten über Schnittstellen und Bussysteme mit dem Gebäudenetzwerk integriert (Industrial Ethernet). Mit effizienten Embedded Systems werden Energiemanagement- und Feedbacksysteme realisiert, die sich beliebig an kundenspezifische Anforderungen anpassen lassen. Leistungsfähige Simulationsrechner, die den modellbasierten

1 *Innenansicht des Smart Energy Lab am Fraunhofer ISE.*

und den »Hardware-in-the-Loop«-Betrieb gestatten, stehen ebenfalls zur Verfügung. So können z. B. beliebige dynamische Szenarien für Last und Erzeugung im häuslichen Kontext aufgeprägt werden.

Das Smart Energy Lab unterstützt Hersteller und Betreiber von Energieanlagen und Steuerungssystemen mit diversen Dienstleistungen. Im Mittelpunkt steht die leistungsfähige, sichere und energieeffiziente Integration aller Komponenten in ein intelligent vernetztes Gebäudeenergiesystem. Zu den Angeboten zählt eine Integrationsbewertung thermischer und elektrischer Anlagen im System, realisiert über Simulation, Optimierung, Betriebsführung und Systemregelung. Dies umfasst auch die Simulation von ökonomischen Szenarien für das »Pooling« von Gebäudeenergieanlagen und virtuellen Kraftwerken. Ferner bieten wir Funktions- und Kommunikationstests von spartenübergreifenden Smart Metering- und Energiemanagementsystemen (Smart Energy Gateways) an. Darüber hinaus können mit einer Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge zentrale und mobile Metering-Systeme entwickelt und getestet werden, während im Softwarebereich Kommunikationsimplementierungen sowie Konformitätstests von Kundengeräten (z. B. SML, IEC 61850, M-Bus) angeboten werden. Abgerundet wird das Dienstleistungsportfolio durch Effizienzbewertungen von Energiemanagement und Erzeugungsanlagen.



PRÄZISE LEISTUNGSMESSUNGEN AN PV-GENERATOREN IM FELD

Leistungsmessungen an Solargeneratoren vor Ort stellen eine zuverlässige Möglichkeit dar, die tatsächliche Leistung der Solarmodule an einer repräsentativen Stichprobe zu überprüfen, ohne dass Module ausgebaut werden müssen. Präzise Messungen mit Messunsicherheiten kleiner 5 % sind möglich, sofern die Messungen von Experten durchgeführt werden, das Messequipment und die Verfahren zur Hochrechnung auf Standardtestbedingungen richtig gewählt werden.

Daniela Dirnberger, Klaus Kiefer, Frank Neuberger, Andreas Steinhüser, Harry Wirth

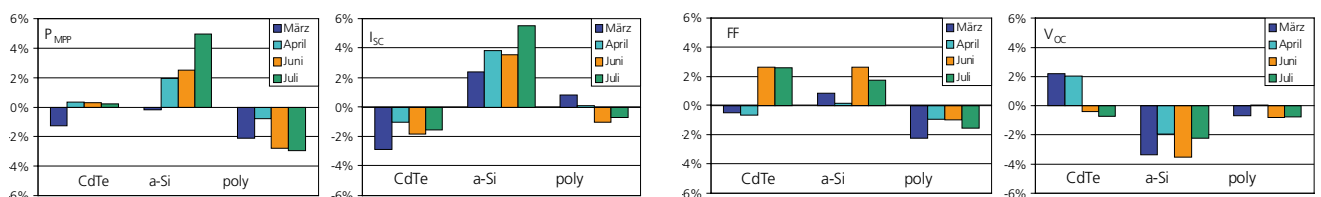
Die Ermittlung der Leistung von Modulen in einer Anlage erfolgt in drei Schritten: Messung der Strom-Spannungskennlinie unter den real herrschenden Bedingungen, Korrektur dieser Messung auf Standardbedingungen und, falls notwendig, Berücksichtigung von externen Einflüssen wie Modulverschmutzung oder Verlusten durch Leitungswiderstände.

Die Strom-Spannungskennlinien werden an einzelnen Strängen und Teilgeneratoren, also Einheiten aus verschalteten Modulen einer Größe von 5 bis 100 kWp, aufgenommen sowie parallel dazu die Modultemperatur und die Einstrahlung gemessen. Die gemessene Leistung wird mit Hilfe von charakteristischen Parametern, die das einstrahlungs- und temperaturabhängige Verhalten von Modulen beschreiben, auf Standardtestbedingungen hochgerechnet.

1 Kennlinienmessungen vor Ort sind sowohl für Freiflächen (A: Höttingen, 4,4 MWp) als auch für Dachanlagen (B: Cambrai/Lidl, 1 MWp) ein zuverlässiges Instrument zur Qualitätssicherung.

Die Gesamtunsicherheit für die Leistungsermittlung wird von mehreren Faktoren beeinflusst. Erstens ist die Unsicherheit der Einstrahlungsmessungen entscheidend, weshalb das Fraunhofer ISE eine primär kalibrierte Referenzzelle ($\pm 0,5\%$) verwendet. Zweiter wichtiger Einfluss ist die Abweichung der realen von Standardbedingungen: Je größer die Abweichungen, desto größer die Unsicherheit durch die Hochrechnung. Aussagekräftige Kennlinienmessungen können daher nur bei ausreichend hohen Einstrahlungen und bei klarem blauem Himmel durchgeführt werden. Drittens können genaue Ergebnisse nur mit sorgfältig bestimmten Modulparametern erzielt werden. Es empfiehlt sich, die notwendigen Messungen an einem Modul stellvertretend für den betrachteten Modultyp durchzuführen.

Im Ergebnis können Unsicherheiten zwischen 3 und 5 % erreicht werden, wenn die genannten Punkte erfüllt sind und die Messungen von Experten durchgeführt werden. Abb. 2 veranschaulicht, dass Messungen vor Ort für verschiedene Technologien eine gute Alternative zu Labormessungen sind.



2 Der Vergleich von Feldmessungen mit Messungen im CalLab PV Modules bestätigt die Genauigkeiten des Mess- und Korrekturverfahrens für verschiedene Technologien.



PV-KRAFTWERKE: STABILE PERFORMANCE ÜBER VIELE JAHRE

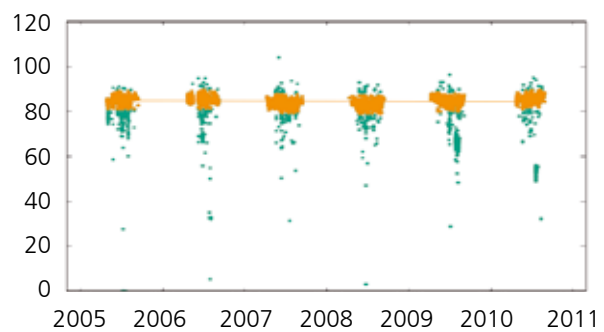
Das Fraunhofer ISE hat seit 1990 mit Beginn des 1000-Dächer-Programms Erfahrungen im Monitoring von PV-Anlagen. Heute werden mehr als 200 Anlagen mit einer Gesamtleistung von 75 MW detailliert vermessen. Die Erfahrung aus dem langjährigen Monitoring zeigen, dass mono- und polykristalline Module über viele Jahre eine zuverlässige Leistung erbringen und keine systematische Degradation erkennbar ist.

Daniela Dirnberger, Wolfgang Heydenreich, **Klaus Kiefer**, Anselm Kröger-Vodde, Björn Müller, Harry Wirth

Das Fraunhofer ISE Monitoringsystem beinhaltet die exakte Messung der Einstrahlung mit kalibrierten Sensoren sowie der erzeugten Energie. Modul- und Umgebungstemperatur werden ebenfalls aufgenommen. Zusätzlich wird für einen Referenzteil der Anlage Strom und Spannung des Solargenerators gemessen, was die Berechnung von Solargeneratorwirkungsgrad und Wechselrichterwirkungsgrad ermöglicht. Sekündliche Messungen werden als 5-Minuten-Mittelwerte gespeichert.

Um langfristige Veränderungen in der Performance Ratio oder dem Solargeneratorwirkungsgrad zu erkennen, müssen Einflüsse durch unterschiedliche Einstrahlungsniveaus und Temperaturen ausgeschlossen werden. Dazu wurden für die genannte Studie aus allen 5-Minuten-Mittelwerten diejenigen bei typischen Betriebsbedingungen (grüne Punkte in Abb. 2) herausgefiltert. Solche Bedingungen entsprechen Einstrahlungen zwischen 800 W/m^2 und 1000 W/m^2 und Modultemperaturen von $40\text{--}45 \text{ }^\circ\text{C}$. Nach Entfernen von Ausreißern wird eine lineare Regression durchgeführt, aus der die Veränderung der Performance Ratio oder des Solargeneratorwirkungsgrads pro Jahr hervorgeht.

1 A/B Zwei PV-Kraftwerke, die seit Inbetriebnahme kontinuierlich gute Erträge bringen: 60 kWp auf dem Dach des badenova-Stadions des SC Freiburg sowie 2 MWp auf einer Freifläche in Bayern.



2 Die Performance Ratio eines 2 MWp Kraftwerks ist über sechs Jahre konstant. 5-Min-Mittelwerte gemessen bei typischen Einstrahlungen und Temperaturen (orange: nach Entfernen von Ausreißern).

Ergebnis einer 2010 durchgeführten Studie ist, dass sich die Performance Ratio der Gesamtanlagen für die betrachteten Systeme mit mono- oder polykristallinen Modulen im Mittel um $-0,1\%$ pro Jahr geändert hat. Der Solargeneratorwirkungsgrad hat sich im Mittel nicht verändert. Diese Erkenntnis zeigt, dass es bei Ertragsgutachten nicht notwendig ist, einen Abschlag für kontinuierliche Degradation von mono- oder polykristallinen Modulen vorzunehmen. Entscheidend für ein aussagekräftiges Ergebnis ist, dass über den betrachteten Zeitraum die Einstrahlung konstant richtig gemessen wurde. Wenn Sensoren driften, d. h. bei derselben Einstrahlung nach einiger Zeit nicht mehr dasselbe Signal liefern, wird das Ergebnis verfälscht. Um solche Fehler auszuschließen, wurden alle Sensoren für die genannte Studie rekaliert. Grundsätzlich empfiehlt sich für moderne Monitoringsysteme alle zwei bis drei Jahre der Austausch von Sensoren.



MEGAWATTLABOR FÜR ZENTRALWECHSELRICHTER

Nicht nur der Anteil der Photovoltaik an der Stromerzeugung steigt stark an, auch die Größe der PV-Kraftwerkseinheiten und die Leistung der Solarwechselrichter vergrößern sich zunehmend. Durch den Aufbau des sogenannten Megawattlabors reagiert das Fraunhofer ISE auf diese Entwicklung und ist nun in der Lage, große Wechselrichter bis zu einer Leistung von 1,25 MW zu betreiben und zu vermessen. Dieses neue Leistungselektroniklabor ermöglicht zum einen die hochpräzise Vermessung von Wechselrichtern (z. B. zur Wirkungsgradbestimmung), zum anderen können alle Prüfungen nach den neuen Mittelspannungsrichtlinien durchgeführt werden. Diese Richtlinien beschreiben, wie sich Solarwechselrichter an der Netzregelung beteiligen und wie sie sich bei Netzfehlern verhalten müssen.

Bruno Burger, Gregor Dötter, Sönke Rogalla,
Stefan Schönberger, Günther Ebert

Mit dem Aufbau des Megawattlabors verfügen wir am Fraunhofer ISE über ein einzigartiges Leistungselektroniklabor, dessen Anforderungen speziell auf den Test und Betrieb von Solarwechselrichtern großer Leistung ausgelegt wurden. Das Labor ist über drei Mittelspannungstransformatoren mit je 1,25 MVA Leistung direkt an das öffentliche Mittelspannungsnetz (20 kV) angeschlossen. Der Wechselrichter speist, wie in großen Solarparks üblich, direkt über einen MS-Transformator in das Mittelspannungsnetz ein. Je nach Wahl des Transformators und dessen Stufenschalterstellung kann die AC-Spannung zwischen 255 V und 760 V angepasst werden. Die Ströme von bis zu 2500 A werden dabei über Stromschienen in das Labor geführt (Abb. 3).

Ein separater Bezugstransformator speist einen Solargeneratorsimulator, der den zu prüfenden Wechselrichter versorgt. Eine Leistung von bis zu 1,25 MW kann auf diese Weise im

1 *Blick in das neue Megawattlabor am Fraunhofer ISE.*

Kreisbetrieb über die Mittelspannungsebene gefahren werden. Es müssen nur die in den Geräten und Transformatoren anfallenden Verluste aus dem öffentlichen Netz zugeführt werden. Der Kreisbetrieb auf Mittelspannungsebene ist vorteilhaft, da dadurch eine Beeinflussung des Wechselrichters durch den Solargeneratorsimulator und umgekehrt minimiert wird. Für die Temperierung des Labors steht eine leistungsstarke Lüftungsanlage zur Verfügung. Der Solargeneratorsimulator besteht aus mehreren parallel geschalteten DC-Quellen, die das elektrische Verhalten eines Solargenerators nachbilden können. Es können DC-Spannungen bis 1000 V und Ströme bis 1600 A zur Verfügung gestellt werden. Damit ist es möglich, im Labor ein Feld von Solarmodulen mit einer Fläche von bis zu zwei Hektar zu simulieren. Die Simulation von verschiedenen Einstrahlungsvariationen, Solargeneratorkonfigurationen und genormten Testprozeduren kann mit einer am Fraunhofer ISE entwickelten Software variabel gesteuert werden. Mit dem Solargeneratorsimulator ist eine gezielte Untersuchung des Maximum-Power-Point-Tracking-Verhaltens (MPPT-Verhalten) von Wechselrichtern bis zu einer Leistung von 1,25 MW möglich. Damit wird die Vermessung des Gesamtwirkungsgrads von Solarwechselrichtern realisiert, in den neben dem Umwandlungswirkungsgrad (elektrische Effizienz) auch der Anpassungswirkungsgrad (MPPT-Wirkungsgrad) eingeht.

Für die Vermessung der Wechselrichter stehen hochpräzise Messwandler und Messgeräte zur Verfügung. Sie ermöglichen die exakte Vermessung des Wirkungsgrads und der Qualität des eingespeisten Stroms. Je nach Anforderung wird auf der Niederspannungs- oder der Mittelspannungsebene gemessen. Zur Auswertung und Datenerfassung bestimmter Testprozeduren haben wir eigene Softwarelösungen geschaffen.



2



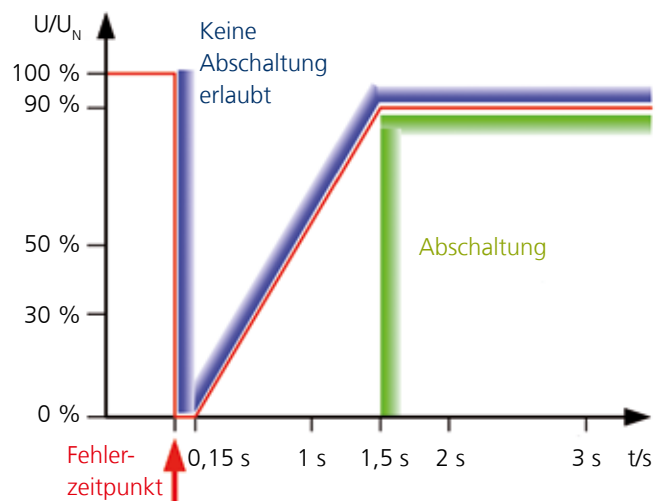
3

Mit Einführung der BDEW-Mittelspannungsrichtlinie wird auch von großen Solarkraftwerken gefordert, sich an der Regelung und Stabilisierung der Stromnetze zu beteiligen, so wie es bisher nur von konventionellen Kraftwerken gefordert war. Neben der gezielten Regelung von Wirk- und Blindleistung müssen nun auch Solarkraftwerke kurzzeitige Netzfehler und Spannungseinbrüche beherrschen (Abb. 4). Solarwechselrichterhersteller müssen nachweisen, dass ihre Geräte diese hohen Anforderungen erfüllen. Nur so kann in Zukunft die Stabilität der Stromnetze sichergestellt und der Anteil an regenerativ erzeugtem Strom weiter gesteigert werden. Mit dem neuen Labor wird Wechselrichterherstellern eine einmalige Möglichkeit geboten, Solarwechselrichter im großen Leistungsbereich umfangreich zu vermessen.

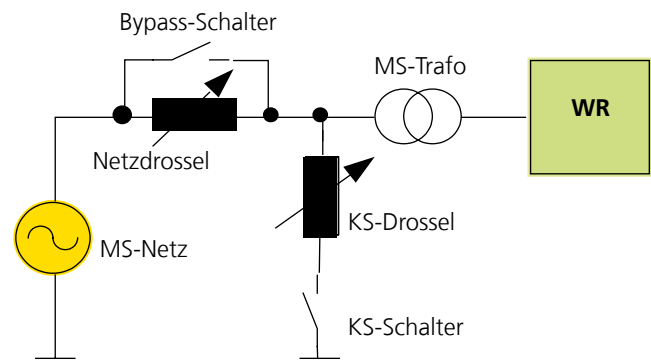
Zur Ausstattung des neuen Megawattlabors gehören alle Prüfeinrichtungen, die notwendig sind, um die geforderten Prüfungen für die Mittelspannungsrichtlinie durchführen zu können. Einmalig ist dabei eine Prüfeinrichtung zur Untersuchung des Verhaltens von Wechselrichtern bei Netzspannungseinbrüchen. Diese so genannte Low-Voltage-Ride-Through-Prüfeinrichtung (LVRT-Prüfeinrichtung, Abb. 5) ist in der Lage reale Spannungseinbrüche auf der 20 kV-Mittelspannungsebene zu erzeugen, ohne dabei das öffentliche Versorgungsnetz zu stören. Die Spannungseinbrüche werden mittels eines induktiven Spannungsteilers erzeugt. Je nach Konfiguration der Induktivitäten können symmetrische und unsymmetrische Spannungseinbrüche verschiedener Dauer und Einbruchtiefe generiert werden. Im Gegensatz zu mobilen Container-Lösungen, die bereits zum Test von Windkraftanlagen eingesetzt werden, betreiben wir eine stationäre LVRT-Prüfeinrichtung, die exakt auf die Anforderungen von Solarwechselrichtern zugeschnitten ist. Die Anlage lässt sich komfortabel über ein Schaltpult bedienen (Abb. 2). Die Ansteuerung der gasisolierten Mittelspannungsschalter und der Messwerterfassung erfolgt automatisiert.

2 Schaltpult zur Steuerung der Mittel- und Niederspannungsschaltanlage und der LVRT-Prüfeinrichtung.

3 Anschlussmöglichkeit von Wechselrichtern bis zu einer Leistung von 1,25 MW Leistung.



4 Anforderungen an Solarwechselrichter hinsichtlich des Verbleibens am Netz bei kurzfristigen Netzspannungseinbrüchen. Bei Spannungseinbrüchen oberhalb der blauen Grenzlinie darf sich der Wechselrichter nicht vom Netz trennen.



5 Prinzipschaltbild der LVRT-Prüfeinrichtung: Die Netzdroessel minimiert die Auswirkungen des Spannungseinbruchs auf das MS-Netz. Das Verhältnis der Induktivitäten bestimmt die Einbruchtiefe.



BATTERIESYSTEME FÜR AUTOMOBILE UND STATIONÄRE ANWENDUNGEN

In automobilen und stationären Anwendungen kommt elektrochemischen Speichern in Zukunft eine Schlüsselrolle zu, um eine nachhaltige Energieversorgung und eine umweltfreundliche Mobilität zu ermöglichen. In verschiedenen Projekten arbeiten wir an innovativen Lösungen, die lange Lebensdauern, hohe Effizienzen und eine hohe Zuverlässigkeit sowie eine einfache Integration in Energiesysteme ermöglichen.

Nils Armbruster, Martin Dennenmoser, Stefan Gschwander, Max Jung, Stephan Lux, **Simon Schwunk, Matthias Vetter**, Günther Ebert

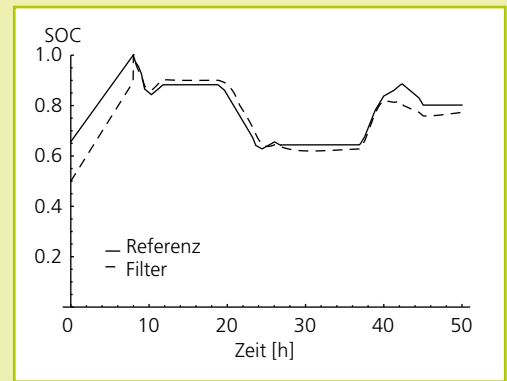
Im automobilen Sektor steht die Industrie vor großen Herausforderungen, welche von Politik und Gesellschaft vor dem Hintergrund klimatischer Veränderungen gestellt werden. Um den Forderungen nach CO₂-freier Mobilität gerecht werden zu können, werden momentan große Anstrengungen im Bereich batteriebetriebener Fahrzeuge unternommen. Ein ähnliches Bild ergibt sich in der Energieversorgung. Bisher waren elektrische Speicher in Verbindung mit Photovoltaik lediglich in Inselanlagen üblich. Allerdings bedingt der rasche Ausbau erneuerbarer Energien neben dem Netzausbau auch einen rasant steigenden Bedarf an stationären elektrischen Speichern. Dies wird zudem durch die Regelung im Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) mit der Vergütung des Eigenstromverbrauchs unterstrichen und gefördert.

Die Auswahl einer geeigneten Zelle für die jeweilige Anwendung ist ein entscheidender Schritt. Verschiedene Anwendungen bedürfen unterschiedlicher Lösungen. So ist z. B. im automobilen Bereich bei Elektrofahrzeugen die Energiedichte eines der wichtigsten Kriterien, während in stationären Anwendungen vor allem die Lebensdauer in der spezifischen Applikation von entscheidender Bedeutung ist. Daher ist es möglich, dass in beiden Anwendungen Lithium-Ionen-Zellen

zum Einsatz kommen, die sich aber aufgrund der verwendeten Elektrodenmaterialien auch in grundlegenden Eigenschaften wie der Zellspannung massiv unterscheiden.

Um die für den Einsatzzweck passende Zelle auszuwählen, sind neben den Datenblattangaben Messungen im Labor unerlässlich. Nur so kann eine einheitliche Qualität der Zellen sichergestellt werden. Zudem lassen sich einige Eigenschaften wie die Zyklenfähigkeit im niedrigen Ladezustandsbereich lediglich experimentell bestimmen. Beginnend mit der Zelle wird ein geeignetes Modul aus bis zu zwölf in Serie geschalteten Zellen entwickelt, das ein an die jeweiligen Erfordernisse der Zielanwendung angepasstes Kühlkonzept beinhaltet. So werden in automobilen Systemen zumeist flüssigkeitsgekühlte Systeme eingesetzt, da die hohen Belastungen bei Beschleunigung und Rekuperation zu starker Zellerwärmung durch ohmsche Verluste führen. In stationären Anwendungen kann aufgrund meist geringerer Anforderungen an Bauraum und Leistung auf eine aufwändige Flüssigkeitskühlung verzichtet und eine Luftkühlung eingesetzt werden. Zunächst simulieren wir die Kühlkonzepte mit unseren Simulationswerkzeugen und testen dann Prototypen im Labor.

Das Batteriemangement auf Modulebene erhält bereits umfassende Intelligenz, um neben den üblichen Aufgaben der Messwerterfassung von Zellspannungen und Temperaturen sowie eines effizienten Cell-Balancing auf Zellebene auch die Fehlererkennung sowie die Ladezustands- und Alterungsbestimmung auf Zellebene zu ermöglichen. Auf dem zentralen Steuergerät des Batteriesystems, dem Energiemanagementsystem, ist eine solch detaillierte Überwachung von mehreren hundert Zellen aufgrund mangelnder Ressourcen nicht zu bewältigen. Dies ist aber aus zweierlei Hinsicht notwendig: Um die Batterie optimal und effizient steuern zu können, werden erstens genaue Kenntnisse über ihren Zustand gefordert. Gerade bei älteren Batterien ist z. B. ein effizientes



- 1 Batteriemodul für automobile Anwendungen bestehend aus zwölf Lithium-Ionen-Zellen.
- 2 Elektronik für das Energiemanagementsystems eines Batteriepack.
- 3 Der Weg von der Zelle über das Batteriemodul mit integrierter Elektronik hin zum Batteriesystem mit intelligenter Regelung.
- 4 Ladezustandsbestimmung für eine LiFePO₄-Batterie.

Balancing allein über die Spannung kaum mehr möglich. Zweitens hat man noch wenig Erfahrung mit diesen Batterien in einem realen Langzeiteinsatz. Das Monitoring der inneren Zustände wie Alterung und Ladezustand ermöglicht eine schnelle Analyse der im Einsatz befindlichen Batteriesysteme, ohne aufwändige und teure Labortests.

Mit unseren Methoden sind wir in der Lage, auch die Ladezustandsbestimmung für Zellen mit sehr flachen Spannungskennlinien, z. B. bei LiFePO₄ / Graphit, zuverlässige und genaue Lösungen anzubieten. Diese Algorithmen laufen auf unseren eingebetteten Systemen mit kleinen Prozessoren und geringem Energieverbrauch. Eine wesentliche Voraussetzung ist neben dem Verständnis der Regelungstechnik und Elektronik tiefes Hintergrundwissen über die verschiedenen Möglichkeiten und Charakteristika der einzelnen Batterietechnologien.

Zur Validierung von Ladezustands- und Alterungsalgorithmen werden in unseren Laboren an der Realität angelehnte Temperatur- und Belastungsprofile an realen Batterien in unterschiedlichen Alterungszuständen nachgefahren und die Algorithmik anhand von Messdaten überprüft. So kann die Zuverlässigkeit bereits vor dem ersten Feldeinsatz gesichert werden.

Vernetzt werden die einzelnen Module untereinander und mit dem Energiemanagement über einen CAN-Bus, welcher sich vor allem durch seine Robustheit im automobilen Einsatz bewährt und auch in anderen Bereichen eine weite Verbreitung

gefunden hat. Das Energiemanagement wird ebenfalls hard- und softwareseitig am Fraunhofer ISE entwickelt. Es bildet die Schnittstelle zwischen dem Batteriesystem und der Außenwelt und übernimmt in automobilen Anwendungen z. B. folgende Aufgaben:

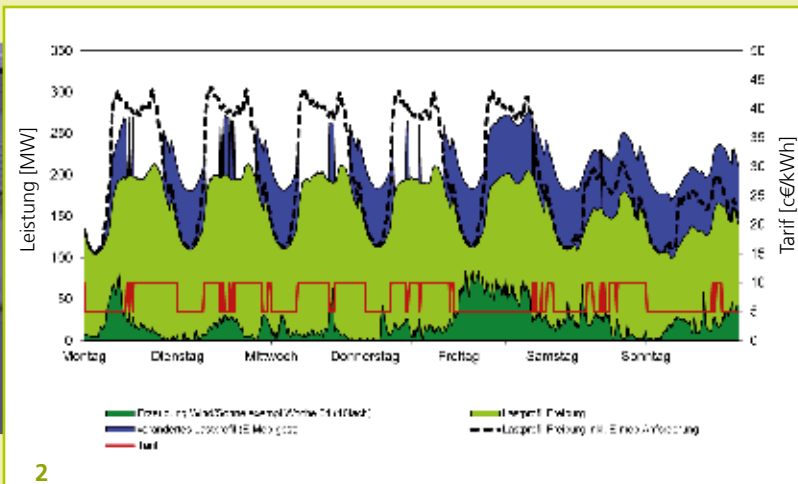
- Überwachung der einzelnen Batteriemangementmodule
- Datenspeicherung, Logging und Fehlerüberwachung
- Leistungsprognose für Beschleunigung und Rekuperation durch die Elektromotoren
- Bestimmung der Sollwerte für die internen/externen Ladegeräte
- Modellbasierte Regelung des Kühlkreislaufs
- Reichweitenabschätzung
- Bestimmung der Notwendigkeit des Austauschs von einzelnen Modulen oder des Packs
- Sicherheit

Zur Entwicklung der Algorithmik wenden wir modellbasierte Verfahren an, mit denen wir die korrekte Funktion testen können, bevor wir ein reales Batteriesystem an die Regelungs hardware anschließen. Gründe hierfür sind neben kürzerer Entwicklungszeiten und höherer Zuverlässigkeit vor allem Sicherheitsaspekte, da Lithium-Ionen-Batterien mit ihren hohen Energiedichten eine erhebliche Gefahrenquelle darstellen. In unserem 250 kW-Teststand werden die Batteriesysteme in Betrieb genommen und getestet. Über eine CAN-Schnittstelle und eine Klimakammer können reale Nutzungsbedingungen z. B. im Fahrzeug emuliert und das Zusammenspiel mit dem Fahrzeugsteuergerät nachgebildet werden. Hierdurch können System, Thermik und Regelung getestet, Sicherheitslücken geschlossen und Verbesserungen durchgeführt werden.

Die Arbeiten werden u. a. im Rahmen der »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität« – gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) – durchgeführt.



1



2

PERSPEKTIVEN DER ELEKTROMOBILITÄT

Erneuerbare Energien sollen in den nächsten Jahren einen großen Anteil unseres Energiebedarfs decken. Bedingt durch die starken Fluktuationen wird die Nutzung von Speicherkapazitäten unausweichlich sein, um Bedarf und Erzeugung zur Deckung zu bringen. Hierzu können Elektrofahrzeuge einen wichtigen Beitrag leisten.

Robert Kohrs, **Bernhard Wille-Hausmann**, Christof Wittwer, Günther Ebert

In den nächsten Jahren wird ein Großteil unseres Strombedarfs aus erneuerbaren Energien oder dezentralen Stromerzeugern gedeckt. Abb. 1 zeigt die Vision eines zukünftigen »Smart Home« mit vielen dezentralen Erzeugern. Dieser Wandel stellt unser aktuelles Energiesystem vor die Herausforderung, neue Lasten, Speicher und Erzeuger zu integrieren. Neben der Vermeidung lokaler Netzengpässe wird es notwendig sein, neue Wege zum Abgleich von Last und Erzeugung zu gehen. In Zukunft werden immer weniger konventionelle Großkraftwerke zur Regelung bereitstehen, so dass fluktuierende und dezentrale Einspeiser und Lasten diese Aufgaben übernehmen müssen. Für ein sicheres Energiemanagement wird deshalb das Erschließen von Speicherkapazitäten unumgänglich sein.

Elektrofahrzeuge können mit ihren Batterien in Zukunft eine Schlüsselrolle einnehmen. Die Batterien könnten geladen werden, wenn ein Erzeugungsüberschuss erneuerbarer

Energien vorhanden ist – z. B. große Produktion von Off-shore-Windkraftanlagen auf der Nordsee. Genauso könnten Elektrofahrzeuge aber auch in Flautezeiten oder an Tagen mit geringer Sonneneinstrahlung kurzfristig Strom an das Netz liefern, um es zu stützen.

Dies setzt allerdings neue Methoden bei der Anbindung und Abrechnung voraus. Hierzu wurde am Fraunhofer ISE ein innovatives mobiles Gateway für die Kommunikation, Abrechnung und Optimierung entwickelt.

Im Projekt »Perspektiven von Elektrofahrzeugen« untersucht das Fraunhofer ISE die Integration von Elektrofahrzeugen im Energieszenario 2050. Lässt man eine Beladung von Elektrofahrzeugen entsprechend der aktuellen Anfrage (Ladung nach Beendigung jeder Fahrt) zu, erhöht dies die ohnehin schon hohen Mittagsspitzen zusätzlich. Abb. 2 demonstriert dies für eine exemplarische Woche in Freiburg. Durch die ungesteuerte Beladung erhöht sich die Netzspitze um ca. 50 %. Dies führt zu einer zusätzlichen Belastung der Netze und schafft keine Integration fluktuierender Erzeuger.

Es stellt sich heraus, dass die CO₂-Effizienz von Elektrofahrzeugen gegenüber herkömmlichen Fahrzeugen am größten ist, wenn sie mit Strom aus erneuerbaren Energien betrieben werden. Eine ungesteuerte Beladung wird dieser Anforderung nicht gerecht. Um die Beladung der Batterien entsprechend eines zentralen Optimierungskriteriums anzupassen, bieten sich zeitvariable Tarife an, die z. B. über ein mobiles Metering-System kommuniziert und abgerechnet werden. Der lokale Optimierer im Fahrzeug kann dann entscheiden, ob er dem Tarifsignal folgt und die Beladung in Niedrigpreiszzeiten verschiebt.

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

1 Im zukünftigen Smart Home steht eine große Anzahl von Stromerzeugern und verschiebbaren Lasten, z. B. Elektrofahrzeuge, für das Energiemanagement zur Verfügung.

2 Ein angepasster variabler Stromtarif im Freiburger Stromnetz verschiebt die Ladezeiten der Elektrofahrzeuge in Zeiten mit geringer Last und einem hohem Angebot erneuerbarer Energien.



INTELLIGENTE LADEINFRASTRUKTUR FÜR ELEKTROFAHRZEUGE

Durch den Strukturwandel unserer Energieversorgung hin zu fluktuierenden erneuerbaren Energien und die beginnende Umstellung der Fahrzeugflotte auf elektrische Antriebe ergeben sich neue Herausforderungen. Von wesentlicher Bedeutung sind hierfür intelligente Ladestationen, die eine nachhaltige Integration von Elektrofahrzeugen in die moderne Energieversorgung ermöglichen.

Eduard Enderle, Dennis Freiberger, **Robert Kohrs**, Jochen Link, Michael Mierau, Dominik Noeren, Bernhard Wille-Haussmann, Christof Wittwer, Günther Ebert

Parallel zur Umstellung der Stromerzeugung, die in zunehmendem Maße Energiespeicher erfordert, wird die Umstellung des Mobilitätssektors vorangetrieben. Elektromobilität wird vor diesem Hintergrund als Chance angesehen, großflächig dezentrale Speicher nutzen zu können. Darüber hinaus ist eine Umstellung auf batteriebetriebene Fahrzeuge umweltpolitisch nur sinnvoll, wenn die Energie zur Fortbewegung aus regenerativen Energien stammt. Mit einer intelligenten Ladeinfrastruktur werden daher mehrere Ziele verfolgt: gesteuertes Laden, Rückspeisung ins Netz und schnelles Laden.

Ist die Standzeit des Fahrzeugs größer als die benötigte Zeit zum Laden der Batterie, kann der Ladevorgang so gesteuert werden, dass dann geladen wird, wenn das Energieangebot größer ist als die Nachfrage. Auf diese Weise lassen sich Fluktuationen in der Erzeugung von Wind- oder Solarstrom abdämpfen. Durch variable Stromtarife wird dem Fahrzeugnutzer ein Anreiz gegeben, sich in diesem Sinn konform zu verhalten. Erlaubt die Ladeinfrastruktur das Rückspeisen von der Fahrzeugbatterie in das Stromnetz, eröffnen sich weitere Möglichkeiten für eine optimierte Betriebsführung. Sinkende Batteriepreise und steigende Zyklenfestigkeit vorausgesetzt, kann sich zukünftig die Pufferung von Energie in den

1 *Vom Fraunhofer ISE entwickelte Ladestation und Toyota Prius Plug-in Hybrid.*

Fahrzeuggatterien auch finanziell lohnen. Denkbar sind die Teilnahme am Regelenergiemarkt oder die Einbeziehung des Fahrzeugs in die Nutzung von selbsterzeugtem Strom aus PV- oder KWK-Anlagen, die durch das EEG gefördert werden. Optimierungsalgorithmen und die Hardware-Plattformen für die heimische Garage, die öffentliche Ladestation und das Fahrzeug werden aktuell von der Forschungsgruppe »Intelligente Energiesysteme« am Fraunhofer ISE entwickelt und evaluiert.

Komplette Ladesysteme inklusive AC- und DC-Ladestationen und On-Board Ladeoptimierer werden im Rahmen des vom BMU geförderten »Flottenversuch Elektromobilität« mit VW und E.ON sowie im BMBF-geförderten Fraunhofer-Verbundprojekt »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität« von uns entwickelt. Für eine optimierte Ladestrategie werden Informationen aus dem Fahrzeug (Batterieparameter), vom Nutzer (Fahrplan), vom Netz (dynamische Tarife, Netzbelastung, Verfügbarkeit Erneuerbarer Energien) und eventuell dem Gebäudeenergiemanagement verarbeitet. Darüber hinaus muss der Ladevorgang vom Energielieferanten autorisiert und abrechnungsrelevante Daten sicher übertragen werden. Um auch bei den ersten marktverfügbaren Fahrzeugen ein gesteuertes Laden zu ermöglichen, werden im badenova-Innovationsfonds-Projekt »Effiziente Mobilität« schlanke Systeme entwickelt, die ohne Kommunikation zum Fahrzeug auskommen. Neben den technischen Systemen ist es entscheidend, dass die Fahrzeuge nicht nur bei leerer Batterie mit dem Netz verbunden sind. Das ist vor allem eine Frage der Nutzerakzeptanz, die wir ebenfalls untersuchen. Parallel bewerten wir energiewirtschaftliche Konzepte zur Integration eines Ladestationsbetreibers in den liberalisierten Strommarkt.

STROM AUS WASSERSTOFF



WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

Wasserstoff setzt bei der Reaktion mit Sauerstoff in einer Brennstoffzelle nutzbare Energie in Form von Strom und Wärme frei. Da Wasserstoff in der Natur jedoch nicht in Reinform vorliegt, muss er aus seinen vielfältigen chemischen Verbindungen gewonnen werden. Dies geschieht unter Einsatz von Energie. Im Idealfall wird erneuerbare Energie in Form von regenerativ erzeugtem Strom für Elektrolyseverfahren verwendet. Ein weiterer Weg ist die Reformierung von gasförmigen bzw. flüssigen Brennstoffen, so genannten Kohlenwasserstoffen oder Alkoholen.

Wasserstoff ist zwar keine Energiequelle, als universeller Energieträger wird er aber ein wichtiger Baustein einer künftigen nachhaltigen Energiewirtschaft sein. Langfristig kann Wasserstoff z. B. zeitlich fluktuierende erneuerbare Energie in nahezu unbegrenztem Umfang in Kavernen zwischenspeichern und alle gewünschten Energiedienstleistungen mit der gewohnten Zuverlässigkeit bereitstellen. Das Anwendungspotenzial von Wasserstoff ist sehr groß: In der dezentralen Energieversorgung können Brennstoffzellen Wärme und Strom aus Erdgas mit bis zu 80 Prozent Gesamtwirkungsgrad erzeugen. Brennstoffzellen dienen in Brennstoffzellenautos und -bussen als schadstofffreie Antriebsaggregate in Kombination mit Batterien. Außerdem können Brennstoffzellen in Auxiliary Power Units (APU) für die Bordnetzstromversorgung sorgen. Schließlich eignen sich Mikrobrennstoffzellensysteme wegen der hohen Energiedichte von Wasserstoff oder Alkohol hervorragend als Ergänzung oder Alternative zu wiederaufladbaren Batterien in der netzfernen Stromversorgung oder in portablen Elektrogeräten. Auch wenn diese Anwendungen im Kontext

unserer Gesamtenergieversorgung wenig unmittelbares Gewicht haben, so sind sie doch für die Einführung von Wasserstoffsystemen wegweisend.

Im Geschäftsfeld »Wasserstofftechnologie« erforschen wir innovative Technologien zur Erzeugung von Wasserstoff sowie dessen Umwandlung in Strom und Wärme in Brennstoffzellensystemen. Zusammen mit unseren Partnern aus Industrie und Wissenschaft entwickeln wir Komponenten bis hin zu integrierten Gesamtsystemen, überwiegend für netzferne, portable und mobile Anwendungen.

Wir entwickeln Reformersysteme zur Umwandlung flüssiger Kohlenwasserstoffe oder Alkohole. Die Anlagen umfassen den eigentlichen Reformierreaktor und, abhängig vom Typ der nachgeschalteten Brennstoffzelle, auch die Gasaufbereitung zur Erhöhung des Wasserstoffanteils und Reduzierung des Anteils an katalysatorschädigendem Kohlenmonoxid im Reformatgas. Die Einsatzgebiete dieser Systeme reichen von der stationären Kraft-Wärme-Kopplung über die Bordstromversorgung (Auxiliary Power Units) bis hin zur netzunabhängigen Stromversorgung.

Um unseren Beitrag zu einer nachhaltigen Energieversorgung zu leisten, beinhaltet unser Portfolio auch die Umwandlung und Nutzung von Biomasse. So entwickeln wir eine Technikum-Anlage zur Holzvergasung, mit der wir die Tauglichkeit eines neuen, am Fraunhofer ISE mitentwickelten Verfahrens demonstrieren wollen. Außerdem forschen wir an einer Reaktorentwicklung zur Biomasseproduktion durch Grünalgen.



Für die Wasserstoffgewinnung aus Wasser entwickeln wir Membran-Elektrolyse-Systeme mit Leistungen von wenigen Watt bis mehreren kW elektrischer Leistung, die einer Produktion von mehreren hundert Litern Wasserstoff pro Stunde entsprechen. Zum vertieften Verständnis der Vorgänge an den Elektroden setzen wir eine Reihe verschiedener Charakterisierungsmethoden wie Rasterelektronenmikroskopie oder Zyklovoltammetrie ein.

Als effiziente, umweltfreundliche, geräusch- und wartungsarme Energiewandler im Leistungsbereich von mW bis in den kW-Bereich setzen wir auf Membranbrennstoffzellen inklusive deren Versorgung mit Wasserstoff oder Methanol. Neben der bekannten Systemarchitektur basierend auf Brennstoffzellenstapeln setzen wir einen weiteren Schwerpunkt auf planare, serienverschaltete Brennstoffzellen in einer Ebene. Dieses Design eignet sich in hervorragender Weise zur flächigen Gehäuseintegration sowie als Teil eines Hybridsystems in Kombination mit der Batterie.

Neben der Komponenten- und Anlagenentwicklung arbeiten wir an der Integration von Brennstoffzellensystemen in übergeordnete Systeme. Wir konzipieren und realisieren die elektrische Systemauslegung inklusive Spannungsaufbereitung und Sicherheitstechnik. Damit schaffen wir die Grundlagen für marktfähige Brennstoffzellensysteme. Unser Angebot umfasst insbesondere Brennstoffzellensysteme zur Bordnetzversorgung in Automobilen, Lastkraftwagen, auf Schiffen oder in Flugzeugen sowie autonome Stromversorgungen für netzferne Anwendungen und für portable elektronische Kleinsysteme.

50-Kanal-Impedanzspektroskop basierend auf synchronisierten Potentiostat-FRA-Einheiten zur orts aufgelösten Charakterisierung von elektrochemischen Energiewandlern wie Brennstoff-, Elektrolyse- oder Redox-Flow-Zellen. Mit dieser Anlage lassen sich die in den Zellen stattfindenden Prozesse durch Analyse zeitlich hoch aufgelöster Sprungantworten sowie der elektrochemischen Impedanzspektroskopie separieren. Mit Hilfe der lokalen Quantifizierung der auf der Zellfläche auftretenden Verlustbeiträge kann dann das Optimierungspotenzial der Zelle abgeleitet werden.

ANSPRECHPARTNER

Brennstoffzellensysteme

Dipl.-Ing. Ulf Groos

Telefon +49 761 4588-5202

ulf.groos@ise.fraunhofer.de

Mikroenergietechnik

Dr. Christopher Hebling

Telefon +49 761 4588-5195

christopher.hebling@ise.fraunhofer.de

Wasserstoffherzeugung und -speicherung

Dr. Thomas Aicher

Telefon +49 761 4588-5194

thomas.aicher@ise.fraunhofer.de

Dr. Tom Smolinka

Telefon +49 761 4588-5212

tom.smolinka@ise.fraunhofer.de



50-KANAL-IMPEDANZ-SPEKTROSKOPIE FÜR BRENNSTOFFZELLEN UND STAPEL

In der Gruppe »Brennstoffzellensysteme« stehen uns seit diesem Jahr zwei neue Messanlagen zur umfangreichen Brennstoffzellencharakterisierung zur Verfügung. Diese in Kanalanzahl und Leistungsbereich weltweit einmaligen Systeme unterstützen neben traditionellen Polarisationskurvenmessungen auch zeitlich hochauflösende Puls- bzw. Stromabschaltmessungen und elektrochemische Impedanzspektroskopie. Ortsauflösende Messungen in Einzelzellen und Einzelzellcharakterisierung im Brennstoffzellenstapel ermöglichen uns, Optimierungspotenzial in Design und Materialauswahl aufzuzeigen und kritische Betriebszustände bzw. lokalisierte Alterungsvorgänge zu detektieren.

Robert Alink, **Dietmar Gerteisen**, Ulf Groos, Stefan Keller, Timo Kurz, Walter Mérida, Max Schwager, Christopher Hebling

Die in der Brennstoffzelle stark gekoppelten komplexen Vorgänge wie elektrochemische Reaktionen, Transport von Edukten, Produkten, Ladungsträgern und Wärme sowie Degradationseffekte, stellen die Forschung bis heute vor große Herausforderungen. Um Wirkungsgrade und Langzeitstabilität zu erhöhen, müssen diese Prozesse separiert und analysiert werden.

Eine leistungsfähige Charakterisierungsmethode stellt dabei die elektrochemische Impedanzspektroskopie dar, die Prozesse mit verschiedenen Zeitkonstanten unterscheiden kann. Die Anwendung dieser Messmethode an unterschiedlichen Positionen in einer segmentierten Brennstoffzelle ermöglicht die ortsaufgelöste Analyse in der Zellebene. Damit können Inhomogenitäten in Feuchte, Temperatur oder Gaskonzentration auf der aktiven Oberfläche detektiert werden. Von besonderem Interesse sind hier auch Start-/Stoppuntersuchung. Zur ortsaufgelösten Impedanzspektroskopie und Strom- bzw.

1 *50-Kanal-Charakterisierungssystem zur ortsaufgelösten Messung von Strom, Spannung und Impedanzspektren.*

Spannungsverteilungsmessung steht uns ein 50-Kanal-Charakterisierungssystem, bestehend aus 50 Potentiostaten und Frequenzganganalysatoren, zur Verfügung. Jeder Kanal kann die Zellsegmente mit bis zu ± 5 A bei einer maximalen Spannung von 3 V pro Kanal belasten, was einem Zellstrom von bis zu 250 A entspricht. Die Impedanzmessung kann in einem Frequenzbereich von 10^{-3} bis 2×10^4 Hz erfolgen. Um Artefakte durch die Verkabelung des Systems mit der Zelle auszuschließen, wird mit speziellen niederinduktiven Lastkabeln gearbeitet. Durch die Verwendung von 4-Quadranten-Potentiostaten mit großem Leistungsbereich ist das Mehrkanal-Charakterisierungssystem auch für Energiewandlertechnologien jenseits der Brennstoffzelle, z. B. Batterien oder Redox-Flow-Zellen einsetzbar.

Beim Einsatz von Brennstoffzellen zur Stromversorgung werden diese in der Regel in einem Stapel elektrisch seriell verschaltet. Mit einer hochdynamisch steuerbaren Last gekoppelt mit einem 50-Kanal-FRA haben wir die Möglichkeit, durch simultane Impedanzspektroskopie unterschiedliche Betriebszustände der Einzelzellen im Stapel analysieren zu können. Während des Experiments können die Umgebungsbedingungen mittels einer 8 m^3 großen Klimakammer mit einer Leistung von 45 kW fest vorgegeben werden. So kann sowohl Kanal- und Porenflutung als auch Austrocknung der Polymer-Elektrolyt-Membran detektiert werden. Mit dem System können Stapel mit bis zu 50 V Gesamtspannung und 100 A Laststrom untersucht werden.

Mit der Kenntnis aus diesen Analysen lassen sich optimale Betriebsfenster bezüglich Leistungsstabilität und Lebensdauer für den untersuchten Stapel definieren.



PRÜF- UND ZERTIFIZIERUNGSLABOR FÜR BRENNSTOFFZELLENSYSTEME

Die Abteilung Energietechnik baut aktuell am Fraunhofer ISE ein Prüf- und Zertifizierungslabor für die normkonforme Prüfung von Brennstoffzellenmodulen und die Prüfung der Leistungsdaten von Mikrobrennstoffzellensystemen auf. Projektpartner ist das VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut.

Ulf Groos, **Jürgen Wolf**, Christopher Hebling

Für die Auslegung und Konstruktion von Brennstoffzellenmodulen (Stacks), Mikrobrennstoffzellensystemen und portablen Brennstoffzellensystemen wurden bereits Normen verabschiedet bzw. sind Normungsentwürfe in Abstimmung. Da diese durch anerkannte Gremien und weltweit akzeptierte Verfahrensweisen öffentlich diskutiert werden, gelten auch bereits die Entwürfe als anerkannter Stand der Technik. Im Zweifelsfall muss daher ein Hersteller nachweisen, dass er diesen Stand der Technik analog zu den relevanten Normen (-entwürfen) einhält.

Projektziel der Partner VDE-Institut und Fraunhofer ISE ist der Aufbau eines Prüflabors zur Durchführung von Sicherheitsprüfungen von kleinen Brennstoffzellensystemen. Folgende Normen und Normungsentwürfe werden durch die aufzubauende Prüfeinrichtung abgedeckt: Begriffe (DIN IEC/TS 62282-1), Brennstoffzellenmodule (DIN EN 62282-2), Portable Brennstoffzellen-Energiesysteme – Sicherheit (DIN IEC 62282-5-1), Mikro-Brennstoffzellen-Energiesysteme – Sicherheit (DIN IEC 62282-6-1), Mikro-Brennstoffzellensysteme – Leistung (DIN IEC 62282-6-2), Mikro-Brennstoffzellen-Energiesysteme – Austauschbarkeit (DIN IEC 62282-6-3).

Das VDE-Prüfinstitut und das Fraunhofer ISE bieten Beratung zur normgerechten Entwicklung, Fehler-Möglichkeiten- und Einflussanalyse (FMEA), normgerechte Prüfung und Zertifizierung an. Dazu werden zwei Teststände bis 1 kW und 5 kW,

- 1 Brennstoffzellenteststand 5 kW_{el}
- 2 Klimakammer für Mikrobrennstoffzellensysteme.
- 3 Klimakammer zum Betrieb von Brennstoffzellenstapeln und -systemen mit Leistungen bis 5 kW_{el} (10 kW_{th}).

eine Unterdruckkammer sowie eine begehbare Klimakammer installiert. Zur Klimakammer wird eine Zuluftklimatisierung bis 2000 m³/h mit Temperaturen von -20 °C bis +60 °C für eine Klimatisierung von +5 °C bis +60 °C in einem Feuchtebereich von 10 % rH bis 95 % rH installiert. Folgende normative Prüfungen werden am Fraunhofer ISE durchgeführt:

Brennstoffzellenmodule bis 5 kW

Gasleckprüfung, Prüfung des zulässigen Betriebsdrucks, Überdruckprüfungen, elektrische Überlastprüfung, Isolationsprüfung, Differenzialdruckprüfung, Prüfung der brennbaren Gaskonzentrationen sowie der anomalen Bedingungen.

Mikrobrennstoffzellensysteme

Startdauer, Bemessungsleistung und -spannung, Prüfung der Leistungsabgabe nach Unterbrechung, Prüfung bei hohen und niedrigen Temperaturen, Prüfung bei hohen und niedrigen Luftfeuchten, Prüfung unter Höheneinfluss, Prüfung des Brennstoffverbrauchs, Fallprüfung.

Darüber hinaus können alle Prüfungen an Brennstoffzellen und Brennstoffzellensystemen durchgeführt werden, für welche die Teststände und die Klimakammer technisch geeignet sind, z. B. Charakterisierung von Einzelzellen und Modulen, Klimaprüfungen, Impedanzmessungen u. v. a. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt sind die Testräume vorbereitet, die Ausrüstung bestellt und teilweise geliefert. Die Inbetriebnahme soll im 1. Halbjahr 2011 erfolgen. Das Projekt wird durch das »Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie« (NIP) gefördert.



HOCHTEMPERATUR-MEMBRANBRENNSTOFFZELLE FÜR PORTABLE ANWENDUNGEN

Zur Stromversorgung von portablen Geräten haben wir ein Brennstoffzellenmodul entwickelt, das eine neue Membrantechnologie nutzt. Diese Hochtemperatur-Polymer-Elektrolytmembran (HTPEM) kann bei Temperaturen oberhalb von 100 °C betrieben werden und zeigt dadurch ein anderes Betriebsverhalten als bisherige Niedertemperatur-Membranen. Mit Hilfe innovativer Materialien und einem neuartigen Systemdesign ist es uns gelungen, die Eigenschaften dieses Membrantyps zur Entwicklung eines kompakten portablen Brennstoffzellenmoduls mit stabilem Betriebsverhalten zu nutzen.

Ulf Groos, Julian Keller, **Timo Kurz**, Christopher Hebling

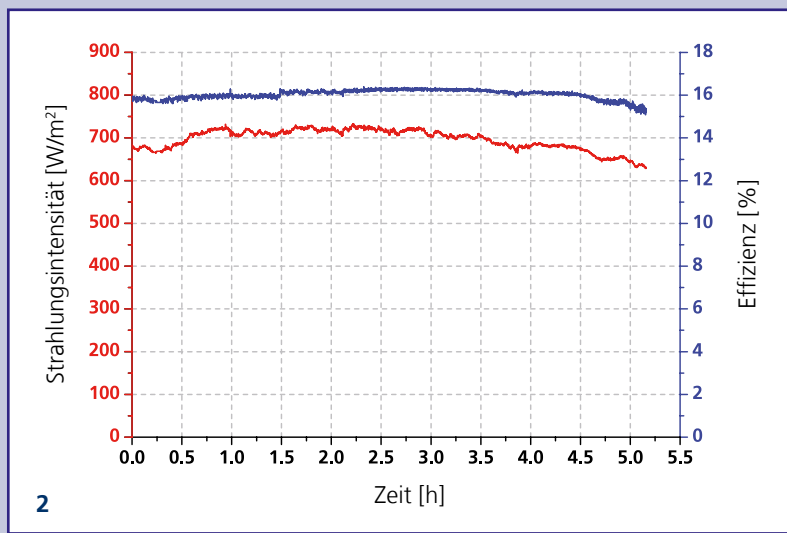
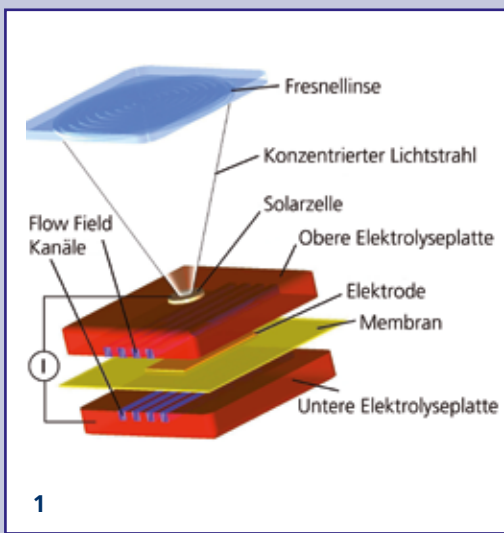
Zur Stromversorgung von portablen Geräten bieten sich Polymer-Elektrolytmembran-(PEM-)Brennstoffzellen als effiziente Alternative zu Akkus oder Verbrennungsmotoren an. Sie benötigen bisher jedoch noch reinen Wasserstoff als Brennstoff, der sich nur mit erhöhtem Aufwand erzeugen und speichern lässt. Außerdem sind konventionelle PEM-Brennstoffzellen im Betrieb auf eine Befeuchtung der Zellmembran angewiesen. Ein seit wenigen Jahren erhältlicher Membrantyp aus Polybenzimidazol (PBI) verspricht, beide Probleme zu lösen: höhere Zelltemperaturen bis 200 °C werden möglich, die Brennstoffzelle ist so in der Lage, Reformatgas aus flüssigen Brennstoffen zu verwenden und die Zellmembran benötigt keine Befeuchtung mehr. Diese Membran stellt jedoch auch neue Anforderungen an Betriebsbedingungen aufgrund einer erhöhten Degradation bei hohen Spannungen und einer stärkeren Empfindlichkeit gegenüber flüssigem Wasser bei niedrigen Temperaturen. Wir haben ein Modul entwickelt, das optimale Betriebsbedingungen für diesen Membrantyp bereitstellt und gleichzeitig kompakt und einfach aufgebaut ist. Durch den Einsatz hochtemperaturbeständiger Kunststoffe und eines neuartigen Anpresskonzepts mit einer Schnurwicklung kann im Gegensatz zur Verpressung mit Gewindestangen

1 *Detailansicht des Brennstoffzellenstapels: Anpressplatte mit Wicklung und Spannschiene zum Aufbringen der Anpresskraft.*

sowohl Gewicht als auch Bauraum eingespart werden. Da die PBI-Membran nicht mehr auf eine Befeuchtung im Betrieb angewiesen ist, kann die Zelle mit einem vergleichsweise hohen Luftstrom betrieben werden. Mit Hilfe numerischer Strömungssimulation wurden Strömungskanäle entworfen, die sowohl die Kühlluft als auch die zur Reaktion notwendige Luft transportieren und gleichzeitig für eine ausgeglichene Temperaturverteilung und einen geringen Druckabfall im Zellstapel sorgen. Dieses Design ermöglicht den Einsatz eines einzigen, leistungsarmen Lüfters, der die peripheren Verluste des Systems im Gegensatz zu anderen Kühlkonzepten minimiert.

Um die Funktionalität der konstruktiven Lösungen zu testen, wurde ein Modulprototyp mit einer Nennleistung von 45 W_{el} umfangreich charakterisiert. Die thermische Charakterisierung ergibt eine erreichbare Aufheizzeit von unter 10 Min. Im Nennbetrieb zeigt der Zellstapel eine maximale Temperaturdifferenz von 9 °C. Das verwendete Kühlkonzept ermöglicht ein dynamisches Zellverhalten sowie eine hohe Modularität des Systems von 5 bis über 90 W_{el}. Die Charakterisierung mit Hilfe von elektrochemischer Impedanzspektroskopie zeigt eine sehr niedrige Impedanz aller Zellen in einem weiten Temperaturbereich und einen ausreichenden Gastransport durch die Kanäle. Das Modul ist skalierbar und kann somit in einem Leistungsbereich bis ca. 500 W_{el} für portable Anwendungen wie Robotik, Kleintraktion oder Messtechnik eingesetzt werden. Durch die hohe Toleranz gegenüber Fremdgasen ist es auch zur Kopplung mit Reformierungssystemen und damit zur Verwendung von gängigen flüssigen und gasförmigen Brennstoffen geeignet.

Die Arbeiten wurden durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unterstützt.



H₂-ERZEUGUNG DURCH ELEKTROLYSE AUS ERNEUERBAREN ENERGIEN

Wasserstoff gilt als vielversprechender Sekundärenergieträger. Neben der großtechnischen Herstellung durch Reformierung lässt sich dieser auch CO₂-neutral mittels elektrolytischer Wasserspaltung unter Einsatz von regenerativ erzeugtem Strom produzieren. Durch ein patentiertes Verfahren ist es uns gelungen, Umwandlungswirkungsgrade von Sonnenlicht in Wasserstoff von über 16 % zu erreichen.

Frank Dimroth, Gerhard Peharz, **Sebastian Rau**, Tom Smolinka, Aurelien Yanwouo, Christopher Hebling

CO₂-neutraler Wasserstoff kann heute schon durch eine geeignete Verschaltung mittels regenerativ erzeugten Stroms von Solarzellen mit einem PEM-Elektrolyseur (Polymer-Elektrolytmembran) effizient produziert werden. In konventionellen Systemen der solaren Wasserstofferzeugung werden PV-Module über eine Gleichstromanpassung direkt mit einer zentralen Elektrolyseeinheit gekoppelt. Nachteile dieses Ansatzes sind der relativ komplexe Systemaufbau und die hohen Investitionskosten. Aufgrund der hohen Wasserstoffgestehungskosten konnte sich deshalb diese Technologie bisher nicht durchsetzen.

Ein am Fraunhofer ISE patentiertes Verfahren erlaubt es, die PEM-Elektrolysezelle direkt in ein solares Konzentratormodul zu integrieren (Abb. 1). Dadurch werden weniger Einzelkomponenten benötigt. Weiter verringern sich Verluste, die durch die elektrische Verschaltung der Solarzelle im Modul entstehen. Jede Solarzelle erzeugt quasi ihren eigenen Wasserstoff, der anschließend als Gasblase abgeführt wird. Die Effizienz ist dabei besonders hoch, da nur kleine Stromdichten fließen. Dieses Konzept ist unter dem Begriff Hydrogen Concentrator (HyCon®) bekannt.

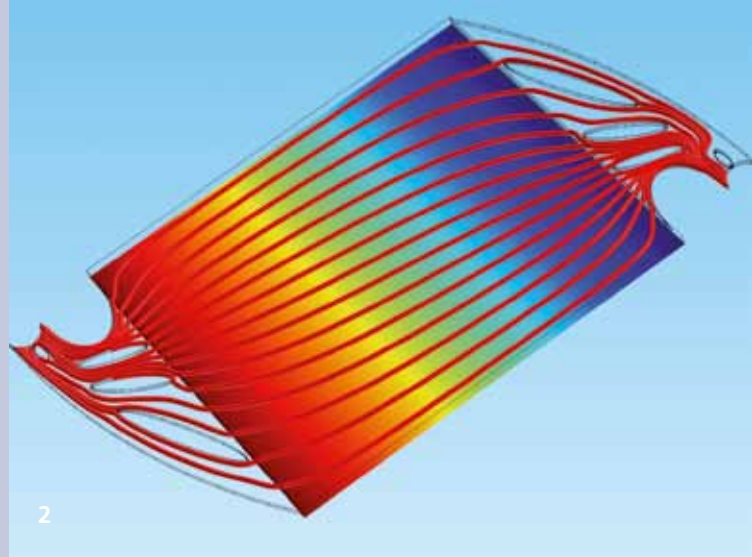
1 Direkte Verschaltung von konzentrierender Solarzelle mit einer PEM-Elektrolysezelle.

2 Hocheffiziente Umwandlung von Solarenergie in Wasserstoff. Messergebnisse einer HyCon®-Zelle während eines Feldtests in Freiburg, Oktober 2010.

Für die Wasserstoffproduktion wird in diesem Verfahren lediglich Sonnenlicht und Wasser benötigt. Zeitgleich wird in der PEM-Elektrolysezelle Sauerstoff produziert, der zusätzlich genutzt werden kann. Feldmessungen in Freiburg haben reproduzierbar gezeigt, dass sich mit Hilfe des HyCon®-Konzepts Umwandlungswirkungsgrade von Sonnenlicht in Wasserstoff von über 16 % realisieren lassen, bei einer direkten Strahlungsintensität von ca. 700 Wm⁻² (Abb. 2).

Um den Wirkungsgrad weiter zu steigern, liegt der Fokus der aktuellen Forschungstätigkeit vor allem in der Optimierung der PEM-Elektrolysezelle. Hier forschen wir zur Zeit an einem verbesserten Zeldesign, um das Zellinnere möglichst homogen mit Wasser zu versorgen sowie elektrochemische Überspannungen zu reduzieren. Des Weiteren betrachten wir alternative Materialien, die in einer solchen HyCon®-Zelle verwendet werden können. Da die heutigen Elektrolysezellen überwiegend aus teurem Titan bestehen, soll dessen Verwendung weitgehend minimiert oder das Material komplett substituiert werden. Die dadurch erreichbare Kostenreduzierung soll es ermöglichen, zukünftig regenerativ erzeugten Wasserstoff zu wettbewerbsfähigen Preisen herzustellen. Eine möglichst hohe Wasserstoffausbeute lässt sich mit diesem Konzept vor allem in Ländern mit hoher Direktstrahlung realisieren, z. B. Spanien oder Nordafrika.

Die Arbeiten werden teilweise durch die E.ON International Research Initiative gefördert.



SIMULATIONSGESTÜTZTE AUSLEGUNG VON ZELLSTAPELN FÜR REDOX-FLOW-BATTERIE

Zur Entwicklung eines skalierbaren Stromspeichers mit einer elektrischen Leistung von 100 kW_{el} und einer Kapazität von 1 MWh_{el} beschäftigen wir uns am Fraunhofer ISE mit der Stack- und Systementwicklung sowie mit dem Batteriemangement von Redox-Flow-Batterien. Mittels simulationsgestützter Analyse und Auslegung von Redox-Flow-Batterien können wir Optimierungspotenziale auf Zell- und Stackebene identifizieren und in der Weiterentwicklung des Designs umsetzen.

Kolja Bromberger, Martin Dennenmoser, Peter Gesikiewicz, Beatrice Hacker, Andreas Kaiser, Karsten Koring, Felix Oßwald, Tobias Schwind, Tom Smolinka, Matthias Vetter, Christopher Hebling

Redox-Flow-Batterien speichern Elektrizität chemisch gebunden in Aktivmassen flüssiger Elektrolyte, die für die positive und negative Seite in Tanks gelagert werden. Zur Energieumwandlung werden die Elektrolyte durch die elektrochemische Zelle gepumpt, so dass die aktiven Ionen der Elektrolyte geladen bzw. entladen werden können. Zentrale Komponente einer Redox-Flow-Batterie ist daher der Zellstapel als elektrochemische Wandlereinheit.

Im Rahmen des vom BMU geförderten Projekts »1 MWh Redox-Flow Netzspeicher« entwickeln wir am Institut optimierte Zellstapel mit Leistungen von 1, 5 und 35 kW_{el} für die Anwendung in Inselsystemen oder auch netzgekoppelten Speichersystemen in Verbindung mit Stromerzeugern aus erneuerbaren Energien. Abb. 1 zeigt einen Zellstapel mit einer aktiven Oberfläche von 700 cm², der mit 18 Zellen eine Leistung von ca. 1 kW_{el} aufweist. Auf Zellebene können Zyklen-Wirkungsgrade von über 80 % erreicht werden.

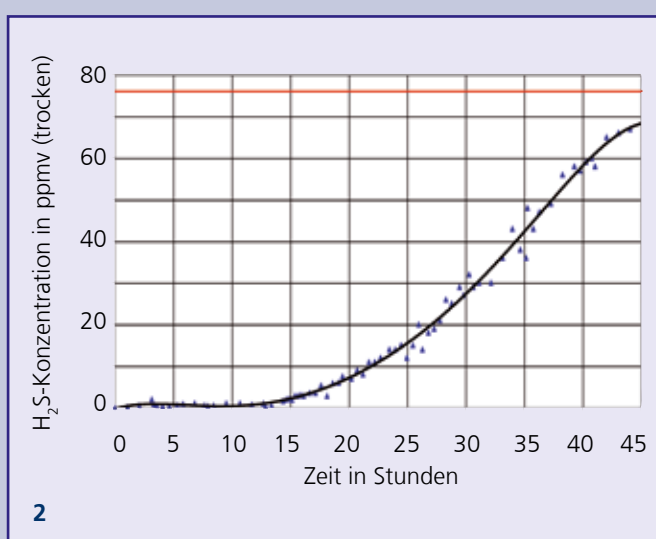
1 Aufbau eines 700 cm²-Zellstapels bestehend aus 18 Zellen mit einer nominellen Leistung von 1 kW.

2 Stationäre Strömungssimulation einer Halbzelle mit dargestelltem Druckfeld und Strömungslinien.

Mittels CFD-Simulation werden grundlegende fluidtechnische Fragestellungen wie die Gestaltung der Ein- und Auslaufbereiche auf Zellebene, Verteilerstrukturen, Fluidführung im Stack sowie geometrische Verhältnisse beantwortet. Abb. 2 zeigt anhand des 1 kW-Zelldesigns die Strömungspfade des Elektrolyten durch eine Halbzelle sowie den Druckverlust über ein Elektrodenmaterial. Daneben prüfen und entwickeln wir geeignete Dichtungskonzepte, die sich auch für Zellstapel von 5 kW und größer eignen.

Zur Reduktion der Speicherkosten werden Zelldesigns entwickelt, die sich im Spritzgussverfahren in großen Stückzahlen herstellen lassen. Durch Materialscreening für Elektroden, Membranen und Bipolarplatten optimieren wir das elektrische Betriebsverhalten der Wandlereinheit. Zur Charakterisierung und Evaluierung steht eine Testumgebung zur Erfassung systemrelevanter Parameter, z. B. Elektrolyttemperaturen, Druckverlust über den Zellstapel, Durchflüsse der Elektrolytkreisläufe und Einzelzellspannungen zur Verfügung.

Ausgehend von diesen Messungen entwickeln wir parallel modellbasierte Regelungsstrategien, die einen energetisch optimierten Betrieb des Redox-Flow-Batteriesystems erlauben. Die so genannte »Smart Redox Flow Control« ermöglicht damit eine optimierte Betriebsweise durch die Minimierung energetischer Verluste der Peripheriegeräte und eine abgestimmte (u. a. durch SOC-Vorhersage) und Lebensdauer verlängernde Einbindung in das übergeordnete Energiesystem. Zusätzlich ermöglichen Lade- und Entladestrategien den Anschluss eines Wechselrichters.



ENTSCHWEFELUNG VON REFORMER-PRODUKTGASEN MITTELS ZINKOXID

Viele Brennstoffe enthalten Schwefelverbindungen, die bei der Reformierung überwiegend in Schwefelwasserstoff (H_2S) umgewandelt werden. Die H_2S -Konzentration im Reformier-Produktgas liegt zwar meist nur im Spurenbereich, dies genügt aber, um die nachgelagerten Katalysatoren, z. B. in der Brennstoffzelle, zu deaktivieren. Daher sollte die H_2S -Konzentration nach dem Reformier so gering wie möglich sein. Am Fraunhofer ISE haben wir im Rahmen eines Industrieprojekts einen Prozess optimiert, bei dem Zinkoxid (ZnO) zur Schwefelentfernung eingesetzt wurde. In Experimenten wurde eine hohe massenbezogene Schwefelbelastung von ca. 15 wt.-% nachgewiesen. Erst nach Erreichen dieser Beladung steigt die H_2S -Konzentration am Austritt der Zinkoxidschüttung über die kritische Marke von einem 1 ppm (parts per million).

Thomas Aicher, Achim Schaadt, Florian Zernikau, Konstantinos Zonaras, Christopher Hebling

Reformer wandeln kommerziell verfügbare Brennstoffe in Wasserstoff um und ermöglichen so die Nutzung der vorhandenen und kostengünstigen Infrastruktur. In Kombination mit Brennstoffzellen lassen sich auch im Teillastbetrieb hohe elektrische Wirkungsgrade erzielen, bei gleichzeitiger Reduktion der Emissionen (Abgas, Lärm). Die Schwefelkonzentrationen in Kraft- bzw. Brennstoffen wurden in den letzten Jahren aufgrund von gesetzlichen Vorgaben deutlich gesenkt. Allerdings sind diese immer noch so hoch, dass in Reformier-Brennstoffzellen-Systemen die dem Reformier nachfolgenden Katalysatoren irreversibel geschädigt werden.

Der Reformierkatalysator selbst toleriert die z. B. in handelsüblichem Dieseldieselkraftstoff enthaltenen Schwefelkonzentrationen ohne nennenswerte Umsatzeinbußen. Daher ist es möglich, den Reformier mit gewöhnlichem Dieseldieselkraftstoff zu betreiben.

- 1 Zinkoxid-Schüttung ActisorbS S2 von der Süd-Chemie AG.
- 2 Durchbruchskurve für die Durchströmung des ZnO -Betts mit einem Gasgemisch (76 ppm H_2S).

Die bei der Reformierung ablaufenden chemischen Reaktionen bewirken, dass der für Katalysatoren giftige Schwefel in Form von Schwefelwasserstoff freigesetzt wird. In dem von uns untersuchten Prozess wird Schwefelwasserstoff bei einer Temperatur im Bereich von 300-350 °C durch eine Schüttung von Zinkoxid (Abb. 1, ActisorbS S2, Hersteller: Süd-Chemie AG) geleitet, welches diesen chemisch bindet. Die Herausforderung lag nun darin, die Reaktion aufgrund der Vorgaben unseres Industriekunden in einem möglichst kleinen Reaktorvolumen so durchzuführen, dass die Austrittskonzentration ca.

1 ppm nicht übersteigt. Dazu war es auch notwendig, eine Schwefelanalytik zu etablieren, die geeignet ist, solch geringe Konzentrationen zuverlässig zu messen. Des Weiteren sollte das Zinkoxidbett möglichst viel H_2S adsorbieren, da dies im späteren System die Anzahl der Wartungen zum Wechseln der Zinkoxidkartusche reduzieren würde. In Abb. 2 ist das Ergebnis eines Experiments dargestellt, bei dem ein synthetisches Reformier-Produktgas mit einer Eintrittskonzentration von 76 ppm H_2S (bezogen auf trockenes Gas) der Zinkoxidschüttung zugeführt wurde. Um in möglichst kurzer Zeit festzustellen, wann die H_2S -Konzentration am Austritt der Schüttung ansteigt, wurde nur ein sehr kleines Schüttungsvolumen (1 cm³) verwendet. Gleichzeitig wurde das Zinkoxidbett mit einem vergleichsweise hohem Gasstrom (2,5 NI/min) durchströmt. Die Raumgeschwindigkeit betrug 150 000 h⁻¹, so dass das Schüttungsvolumen unter Normbedingungen in der Stunde 150 000-fach durchströmt wurde. Es zeigte sich, dass die nur ein Kubikzentimeter große Schüttung ausreichte, um für ca. 14 Stunden die H_2S -Konzentration von 76 ppm auf ca. 1 ppm zu senken. Dies wurde nur möglich, indem eine hohe massenbezogene Schwefelbelastung von 15 wt.-% erzielt werden konnte.



REGENERIERUNG VON RUSSPARTIKELFILTERN MIT KRAFTSTOFFDAMPF UND SYNTHESYGAS

Die vor allem bei Diesel- und bei Benzinmotoren mit Direkteinspritzung auftretenden Rußpartikel sind lungengängig und können Krebserkrankungen auslösen. Sie müssen deshalb durch geeignete Filtersysteme aus dem Abgas entfernt werden. Der Partikelfilter belädt sich mit Ruß und muss von Zeit zu Zeit regeneriert werden. Die Regenerierung des Partikelfilters benötigt eine bestimmte Abgas- oder Filtertemperatur. Es wurde ein am Fraunhofer ISE entwickelter Brennstoffverdampfer am Motorenteststand bei MAN Nutzfahrzeuge AG eingebaut und erfolgreich getestet. Der verdampfte Kraftstoff konnte am nachfolgenden Oxidationskatalysator schon bei niedrigen Abgastemperaturen gezündet werden. Die Filterregenerierung ist dadurch auch in schwachlastnahen Betriebspunkten möglich.

Thomas Aicher, Stefan Riederer, Malte Schlüter,
Robert Szolak, Christopher Hebling

Mit Einführung der Euro-5-Norm im Jahr 2009 wurden die Grenzwerte für Partikel- und Stickoxidemissionen stark gesenkt. Diese Grenzwerte sind alleine mit motorischen Maßnahmen nicht zu erreichen. Es werden hierfür zusätzliche Maßnahmen, z. B. der Einsatz von Partikelfiltern, benötigt.

Partikelfilter werden solange mit Ruß beladen, bis ein maximal zulässiger Abgasgedruck erreicht wird. Dann werden die Filter regeneriert, indem der Ruß abgebrannt wird. Dafür ist üblicherweise eine Filtertemperatur von mehr als 600 °C erforderlich. Die Regenerationstemperatur wird im Motorbetrieb jedoch nicht erreicht. Ein gängiges Verfahren zur Regenerierung des Dieselpartikelfilters (DPF) ist die Kombination aus dem CRT-Verfahren (Continuous Regeneration Trap) und einer Kraftstoffnacheinspritzung. Beim CRT-Verfahren wird in einem Oxidationskatalysator (DOC) das im Abgas enthaltene Stickstoffmonoxid zu Stickstoffdioxid umgewandelt. Das

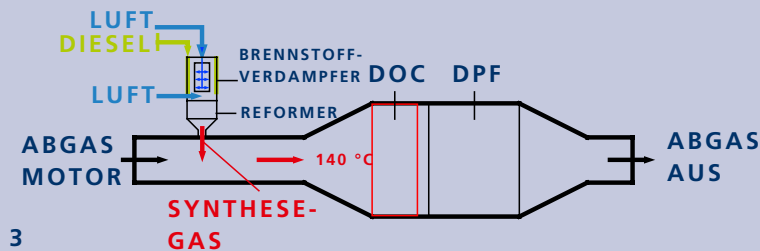
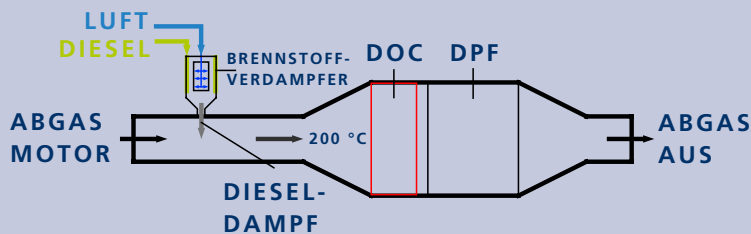
1 *LKW Motor MAN Nutzfahrzeuge AG.*

2 *Brennstoffverdampfer, Fraunhofer ISE.*

Stickstoffdioxid kann den Ruß bei deutlich niedrigeren Temperaturen oxidieren als der molekulare Sauerstoff im Abgas, die Filterregenerierung kann deshalb bereits ab ca. 270 °C durchgeführt werden. Je nach Betriebszustand kann jedoch nicht die notwendige Menge an Stickstoffdioxid oder die notwendige Temperatur bereit gestellt werden. Deshalb wird flüssiger Kraftstoff eingedüst, wenn die Rußbelastung des Filters zu hoch wird. Im DOC wird der Kraftstoff durch Restsauerstoff im Abgas oxidiert. Durch die damit einhergehende Erhöhung der Abgastemperatur wird der DPF aufgeheizt und die Oxidation des angelagerten Rußes durch Stickstoffdioxid und Restsauerstoff im Abgas setzt ein.

Allerdings können DPF bislang noch nicht in allen Betriebspunkten eines Fahrzeugs wirksam regeneriert werden. Insbesondere im Schwachlastbetrieb (z. B. im Stadtbetrieb) ist die Abgastemperatur häufig zu gering, um den eingedüsten Kraftstoff am DOC vollständig zu oxidieren. Bei der Direkteinspritzung von flüssigem Diesel wird der Kraftstoff im Abgasstrom verdampft. Durch die Verdampfungsenthalpie wird dem Abgas Wärme entzogen und die Abgastemperatur sinkt. Bei zu niedrigen Abgastemperaturen kann es somit am DOC zu Kondensationseffekten kommen, der kondensierte Kraftstoff kann den Katalysator belegen und sogar schädigen. Durch eine Vorverdampfung des Diesels kann das verhindert werden. Dadurch können Kondensationseffekte vermieden und der DPF kann zudem bei niedriger Abgastemperatur regeneriert werden.

Zur Verdampfung des Dieseldieselkraftstoffs haben wir ein neues Verfahren entwickelt. Einige Brennstoffe wie Diesel, Heizöl und Bioöle bilden bei herkömmlichen Verdampfungsverfahren Rückstände. Mit dem neuen Verfahren ist es erstmals möglich,



Diesel, Heizöl und Bioöle rückstandsfrei zu verdampfen. Der Brennstoffverdampfer ist einfach aufgebaut und sehr robust. Ein geringer Teil des Brennstoffs wird an einem Katalysator oxidiert und die dabei erzeugte Wärme zur vollständigen Verdampfung des Brennstoffs genutzt. Die Luftzugabe erfolgt dabei stark unterstöchiometrisch (Luftzahl ca. 0,1). Die Wärmeübertragung erfolgt überwiegend durch Wärmestrahlung vom Katalysator auf die Oberfläche des Brennstofffilms. Die Reaktorwand, auf die der Brennstoff aufgegeben wird, ist immer kälter als der Brennstoff selbst; so entstehen keinerlei Ablagerungen und Verkrustungen. Der Brennstoffverdampfer muss nur zu Beginn aufgeheizt werden, nach dem Start kann die externe Heizung ausgeschaltet werden. Für den Start reicht es aus, den Katalysator zu erwärmen. Durch die geringe thermische Masse können sehr kurze Aufheizzeiten erzielt werden. Der Brennstoffverdampfer ist deshalb für mobile Anwendungen sehr gut geeignet.

Der am Fraunhofer ISE entwickelte Brennstoffverdampfer wurde an einem Motorenprüfstand der MAN Nutzfahrzeuge AG eingebaut und erfolgreich getestet. Hierbei wurde ein D 2066 Dieselmotor mit 286 kW eingesetzt. Die Versuche wurden mit dem Brennstoffverdampfer und dem HCl-System (Direkteinspritzung) mit luftunterstützter Kraftstoffeinspritzung durchgeführt. Sie haben gezeigt, dass die Regenerierung des Rußpartikelfilters durch den Brennstoffverdampfer bei niedrigeren Abgastemperaturen durchgeführt werden konnte. Der Brennstoffverdampfer zeigte während der Versuche eine gute Dynamik, die Regenerierung des Rußpartikelfilters konnte auch im Buszyklus durchgeführt werden.

Durch moderne Brennverfahren wird das Abgas von Dieselmotoren immer kälter. Zudem werden vermehrt Motoren mit Start-Stopp-Automatik angeboten. Die Abgastemperatur kann dabei deutlich unter 200 °C liegen (ca. 160 °C), das HCl-System kann bei solcher Abgastemperatur ohne Zusatzapplikation

3 Verfahren zur Regenerierung von Rußpartikelfiltern. *Oben wird der Kraftstoff vorverdampft in den Abgasstrang zugegeben. Der Rußpartikelfilter kann noch bei Abgastemperaturen bis 200°C regeneriert werden. Unten wird der Brennstoffverdampfer um eine Reformiereinheit erweitert. Dabei wird ein Synthesegas produziert, das mit dem Motorabgas bei 140°C zünden kann. Der Rußpartikelfilter kann somit in allen Lastpunkten regeneriert werden.*

nicht mehr zum Einsatz kommen. Am Fraunhofer ISE haben wir deshalb Untersuchungen durchgeführt, die den Einfluss von Synthesegas auf die Zündtemperatur des DOC zeigt. Bei den Untersuchungen wurde die Abgaszusammensetzung im Schwachlastbetrieb eingestellt. Zu dem Abgas wurde anstelle des verdampften Dieseldieselkraftstoffs Synthesegas eingeleitet. Die Zündtemperatur konnte dadurch auf 140 °C gesenkt werden. Durch das Synthesegas kann die Partikelfilterregenerierung somit in allen Betriebszuständen, auch bei den modernen Brennverfahren, durchgeführt werden. Zur Erzeugung des Synthesegases muss der Brennstoffverdampfer lediglich um einen Reformierreaktor erweitert werden. Der Kraftstoffdampf wird im Reformierreaktor mit zusätzlicher Luft zu einem Synthesegas umgesetzt. Die Luftzugabe erfolgt dabei ebenfalls stark unterstöchiometrisch (Luftzahl ca. 0,3). Der Brennstoffverdampfer sowie der Reformierreaktor sind in einem Gehäuse untergebracht. Durch diese kompakte Bauweise können sehr schnelle Startzeiten erreicht werden. Nach dem Start wird keine externe Beheizung benötigt. Durch den Brennstoffverdampfer ist es möglich, die zusätzliche Luft für die Reformierung homogen mit dem Kraftstoffdampf zu mischen. Dabei werden Rußbildungen in der Reformierzone vermieden.

QUALITÄT SETZT SICH DURCH

CLIMATE CHAMBER

The image shows a close-up of a climate chamber. The chamber's surface is covered in a vertical ribbed pattern. The text 'CLIMATE CHAMBER' is printed in a bold, white, sans-serif font, slanted upwards from left to right. The background is a gradient of teal and blue, with some darker areas on the right side, possibly indicating the interior or a shadowed part of the chamber.

SERVICEBEREICHE

In der boomenden Solarindustrie nehmen Materialprüfung, Zertifizierung und Qualitätssicherung von Komponenten und kompletten Anlagen einen immer wichtigeren Stellenwert ein. In Ergänzung zu unserer Forschung und Entwicklung bieten wir Kunden entsprechende 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 Wechselrichterlabor, eine Testeinrichtung für Lüftungskompaktgeräte, ein Labor für die Qualifizierung von Phasenwechselmaterialien (PCM), ein Teststand für thermisch angetriebene Wärmepumpen, ein Batterie-Prüflabor für Zellen und Systeme sowie ein Lichtlabor.

Über ihr Dienstleistungsangebot hinaus haben diese Einrichtungen für uns 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

Am TestLab Solar Thermal Systems werden in erster Linie Industrieaufträge zur Prüfung von Kollektoren nach europäischen und internationalen Kollektornormen oder Qualitätslabeln, z. B. den »Solar Keymark Scheme Rules« des CEN, durchgeführt. Einzigartig ist die Möglichkeit der Kollektorprüfung bei Temperaturen bis 200 °C. Dies ermöglicht die prüftechnische Erschließung neuer Anwendungen wie Prozesswärme sowie Tests zur Stagnation. Das TestLab Solar Thermal Systems konnte auch 2010 deutlich ausgebaut werden und bietet nun ein noch weiteres Feld an Kooperationsmöglichkeiten (s. Beitrag S. 121).

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 (z. B. transparente Fassadenkollektoren und BIPV). Neben den akkreditierten Prüfungen werden umfangreiche Dienstleistungen zum Thema Blendschutz und Tageslichtversorgung angeboten (s. Beitrag S. 122).

Geprüft werden im Rahmen der Akkreditierung:

- g-Wert (auch kalorimetrisch)
- Transmissionsgrad: spektral und integral
- Reflexionsgrad: spektral und integral
- U-Wert

Ebenfalls 2006 wurde das TestLab PV Modules für die Bauartzulassung für PV-Module gemäß IEC 61215 und IEC 61646 akkreditiert. Seit 2010 befinden sich sämtliche Prüf- und Testeinrichtungen in einem Gebäude, so dass sich die Prüfabläufe noch effizienter und sicherer durchführen lassen. Das Ziel der Einrichtung ist die Qualitätssicherung der Zuverlässigkeit von PV-Modulen, die in dem stetig wachsenden Markt immer wichtiger wird. Im Rahmen der Kooperation mit dem VDE-Institut übernimmt das Fraunhofer ISE alle Performance-Prüfungen, das VDE-Institut führt die Sicherheitsprüfungen durch und 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 den Kalibrierlaboren am Fraunhofer ISE – CalLab PV Cells und CalLab PV Modules – zusammen (s. Beitrag S. 118 ff.).

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 CallLab PV Modules ist einerseits Bestandteil der Modul-Zertifizierung und dient andererseits der Qualitätssicherung von Anlagen sowie der Unterstützung bei der Entwicklung (s. Beitrag S. 119).

Das Batterielabor des Fraunhofer ISE testet und prüft für Hersteller, Systemintegratoren und Anwender Batterien und Batteriesysteme aller gängigen Technologien und Ausführungen. Hierzu stehen frei programmierbare Batterietestgeräte bis 250 kW Leistung zur Verfügung, mit denen frei programmierbare Lade- und Lastgänge gefahren werden können. Das Spektrum reicht von Kleinzellen für den Consumer-Bereich über Batterien für PV-Systeme bis zum Test von großen Batteriepacks für den automobilen Einsatz. Wir führen die elektrische und thermische Charakterisierung sowie Alterungsuntersuchungen durch.

Das TestLab PV Modules am Fraunhofer ISE prüft und zertifiziert PV-Module gemäß IEC 61215 und IEC 61646. Zu den Testeinrichtungen zählt auch eine kombinierte UV- und Feuchte-Wärme-Klimakammer. Hier werden die PV-Module bei einer UV-Dosis von max. 250 W/m², einer Feuchte von max. 60 Prozent r. F. und einer Temperatur von max. 90 °C gealtert und geprüft.

Im Lichtlabor untersuchen und optimieren wir für Hersteller und Anwender Leuchtmittel und Beleuchtungssysteme aller gängigen Technologien und Ausführungen. Unsere Laborausstattung ist speziell auf die Anforderungen von photovoltaisch versorgten Beleuchtungssystemen kleiner Leistung ausgelegt. Darüber hinaus können auch netzversorgte Standard-Leuchtmittel und Leuchten vermessen werden. Im Vordergrund steht dabei immer das System, also Leuchtmittel mit elektronischer Ansteuerung und optischer Peripherie sowie der solarelektrischen Stromversorgung (PV, Laderegler, DC/DC-Wandler) bei netzautarken Leuchten.

ANSPRECHPARTNER

CallLab PV Cells

Dr. Wilhelm Warta

Telefon +49 761 4588-5192
wilhelm.warta@ise.fraunhofer.de

Jutta Zielonka

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. 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

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.-Phys. Tilmann Kuhn Passive und aktive thermische Solarnutzung, Sonnenschutz	Telefon +49 761 4588-5297 tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de
	Dr. Helen Rose Wilson Spektrometrie und BIPV	Telefon +49 761 4588-5149 helen.rose.wilson@ise.fraunhofer.de
	Dipl.-Ing (FH) Ulrich Amann g-Wert Prüfung	Telefon +49 761 4588-5142 ulrich.amann@ise.fraunhofer.de
	Dr.-Ing. Jan Wienold Tageslichtmessräume	Telefon +49 761 4588-5133 jan.wienold@ise.fraunhofer.de
Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken	Dipl.-Ing. Vladimir Hadek Ertragsgutachten	Telefon +49 761 4588-5789 vladimir.hadek@ise.fraunhofer.de
	Dipl.-Ing. Andreas Steinhüser Anlagenprüfung	Telefon + 49 761 4588-5225 andreas.steinhueser@ise.fraunhofer.de
	Dipl.-Ing. Anselm Kröger-Vodde Monitoring	Telefon +49 761 4588-5671 anselm.kroeger-vodde@ise.fraunhofer.de
Photovoltaik Leistungselektronik	Prof. Bruno Burger Charakterisierung von Wechselrichtern	Telefon +49 761 4588-5237 bruno.burger@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 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



1

www.callab.de

KALIBRIEREN VON SOLARZELLEN NACH INTERNATIONALEN STANDARDS

Das CallLab PV Cells am Fraunhofer ISE bietet die Vermessung/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, Luca Greco, Jochen Hohl-Ebinger, Thomas Hultsch, Katinka Kordelos, Simone Petermann, Michael Schachtner, Holger Seifert, Astrid Semeraro, **Gerald Siefer, Wilhelm Warta**, Jan Weiß, Jutta Zielonka

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 entscheidende Rolle für den Ertrag im praktischen Einsatz. Wir haben ein neues Verfahren implementiert, das es uns erlaubt, die Temperaturkoeffizienten mit bisher unerreichter Präzision zu bestimmen. Schlüssel dazu ist die Messung der temperaturabhängigen spektralen Empfindlichkeit.

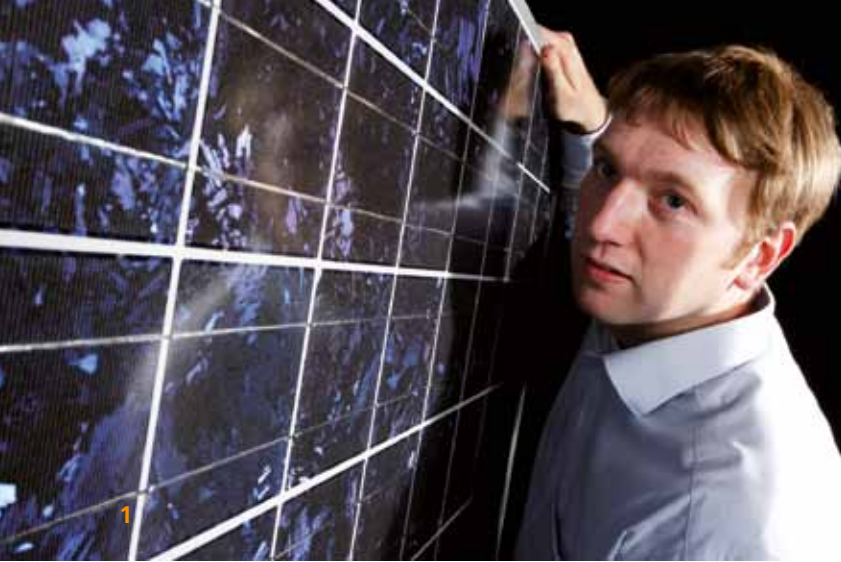
Mitte des Jahres konnten wir mit einem Umzug in neue Laborräume unsere Messmöglichkeiten unter dem Aspekt der Umgebungsbedingungen weiter optimieren und durch eine verbesserte Infrastruktur jetzt eine noch bessere Versorgung der Industrie mit Referenzen sicherstellen.

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 verstärkt an der Entwicklung von Messverfahren für neuartige Solarzellen. Dabei stehen Dünnschicht- und organische Solarzellentechnologien im Vordergrund. Eine besondere Herausforderung stellen Mehrfach-Zellstrukturen dar. Hier können wir vorteilhaft unsere Erfahrungen mit der Kalibrierung von Mehrfachsolarzellen für Weltraum- und terrestrische Konzentratoranwendungen einbringen. Mit der Kalibrierung organischer Mehrfachzellen konnten wir in diesem Jahr die rasante Entwicklung dieser Technologie durch präzise Messungen unterstützen.

Kalibrierung von Mehrfachsolarzellen

- Die spektrale Empfindlichkeit bzw. externe Quanteneffizienz von Mehrfachsolarzellen wird an unserem Gittermonochromatormessplatz durchgeführt, der speziell für die Vermessung von Mehrfachsolarzellen erweitert wurde.
- Die Strom-Spannungskennlinie messen wir mit unserem Mehrlichtquellensimulator unter nahezu beliebigen Normbedingungen, z. B. AM0 (ISO 15387) für Weltraum- und AM1.5d (ASTM G173-03) für Konzentratoranwendungen.
- Konzentratorzellen können mit unserem Blitzlichtsimulator bei bis zu 5000facher Konzentration vermessen werden.
- Zusätzlich arbeiten wir an einem Sonnensimulator mit sechs unabhängigen Lichtquellen zur kalibrierten Vermessung von Solarzellen mit bis zu sechs pn-Übergängen.



KALIBRIERUNG VON PV- UND KONZENTRATORMODULEN

Das CallLab PV Modules (www.callab.de) am Fraunhofer ISE zählt seit 20 Jahren zu den weltweit führenden Photovoltaik-Kalibrierlaboren. Wir kalibrieren Referenzmodule für Produktionslinien und überprüfen an ausgewählten Stichproben die Einhaltung der garantierten Leistung nach internationalen Standards.

Boris Farnung, Tobias Gandy, Martin Jantsch, Jürgen Ketterer, Martin Kaiser, Klaus Kiefer, Ulli Kräling, **Frank Neuberger**, Gerhard Peharz, Michael Schachtner, **Gerald Siefer**, Mark Tröscher

Die präzise Kalibrierung von Modulen spielt sowohl in Forschung und Entwicklung als auch bei der Produktion eine bedeutende Rolle. Sie ist unverzichtbar für Modulhersteller, Investoren und Betreiber von PV-Kraftwerken. Neben der präzisen Messung der Leistung bieten wir die Entwicklung von Messstandards für neue Technologien, die Qualifizierung von kompletten Sonnensimulatoren in den Produktionslinien und die Weiterentwicklung von deren Komponenten an. Dies erfolgt unter Einsatz der am Fraunhofer ISE entwickelten hochpräzisen Messtechnik.

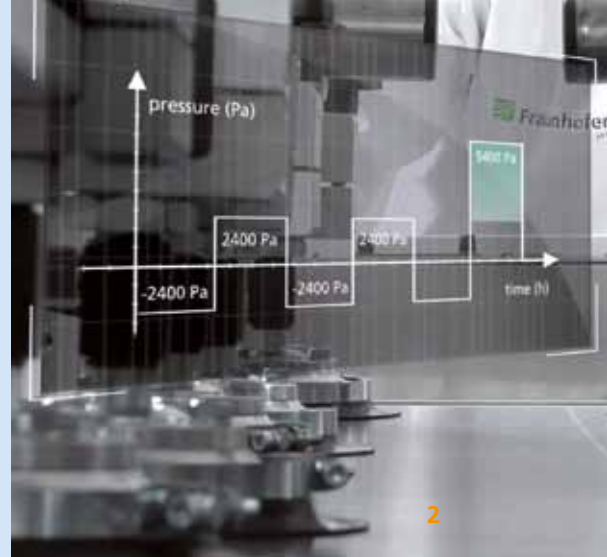
Zusätzlich zu unseren Sonnensimulatoren stehen uns weitere Einrichtungen wie Lightsoaking-Einheiten, Outdoor-Teststände und Spektrometer zur Komplett-Charakterisierung von PV-Modulen zur Verfügung. Unsere langjährige Erfahrung im Bereich Modulkalibrierung in Kombination mit neuestem Messequipment und effektive Arbeitsprozesse ermöglichen uns die zeitnahe Durchführung komplexer kundenspezifischer Aufgabenstellungen.

1 Vorbereitung der Leistungsmessung von PV-Modulen am Fraunhofer ISE.

2 FLATCON®-Konzentratormodule montiert auf der Nachführeinheit zur Vermessung der Strom-Spannungskennlinie unter Freilandbedingungen.

Vermessen von Konzentratormodulen

Die Vermessung von Konzentratormodulen erfolgt standardmäßig unter Freilandbedingungen. Hierzu steht uns eine Nachführeinheit mit Messdatenerfassung zur Verfügung, die neben der Strom-Spannungskennlinie auch alle relevanten Einstrahlungs- und Wetterdaten aufnimmt. Des Weiteren betreiben wir einen Labormessplatz zur Vermessung von Konzentratormodulen. Kernstück dieses Messplatzes ist die Parallelisierung des Lichts einer Blitzlampe durch einen Parabolspiegel mit 2 m Durchmesser.



KAPAZITÄTEN FÜR TESTS UND ZERTIFIZIERUNG VON PV-MODULEN AUSGEBAUT

In 2010 wurden die Prüfkapazitäten des TestLab PV Modules weiter ausgebaut und Prüfeinrichtungen räumlich konzentriert. Dadurch konnten die Prüfabläufe optimiert und die Prüfzeiten für die Bauartzulassung von PV-Modulen gemäß IEC 61215 und IEC 61646 weiter verkürzt werden.

Holger Ambrosi, Heinrich Berg, Ilie Cretu, Jürgen Disch, **Claudio Ferrara**, Michael Köhl, Kerstin Körner-Ruf, Amelie Köpple, Georg Mühlhöfer, Daniel Philipp

Neue und am Fraunhofer ISE neu entwickelte Prüfeinrichtungen ermöglichen schnellere Prüfungen nach geltenden IEC-Normen sowie Prüfungen gemäß Kundenvorgaben für FuE-Projekte und bieten entwicklungsbegleitende Unterstützung.

Neben der Vergrößerung der Prüf- und Testkapazitäten und der Verkürzung der Prüfzeiten wurde die Entwicklung der Prüfeinrichtungen vorangetrieben. Diese dienen der Untersuchung von kombinierten Effekten, die eine weitere Reduktion des Zeitaufwands und genauere Aussagen über das Langzeitverhalten von PV-Modulen ermöglichen. Eine dieser neu entwickelten Prüfeinrichtungen ist eine UV-Bestrahlungseinheit, die für den kombinierten Betrieb in einer Feuchte-Wärme-Klimakammer entwickelt wurde (s. Abb. 1).

Die Lichtstabilisierung für Dünnschichtmodule wird in einer Klimakammer mit Dauerlichtsolarsimulator (Klasse BBB) mit kontrollierter, konstanter Modultemperatur durchgeführt. Für

1 In der kombinierten UV- und Feuchte-Wärme-Klimakammer können PV-Module bei einer maximalen UV-Dosis von 250 W/m², einer maximalen Feuchte von 60 % r. F. und einer maximalen Temperatur von 90 °C gealtert und geprüft werden.

2 Mechanischer Laststest. Er erlaubt die automatisierte Durchführung von IEC-konformen Prüfungen und Prüfungen, die darüber hinausgehen (maximale Druck- und Sogleistung 10 kPa).

neue Dünnschichttechnologien können hier verschiedenste Parameterstudien durchgeführt werden. So können z. B. die Module bei unterschiedlichen Modultemperaturen einer bestimmten Strahlung ausgesetzt werden, um optimale Bedingungen für die Stabilisierung von PV-Modulen mit Dünnschichttechnologien zu finden. Während der Stabilisierungsphase werden mehrmals pro Stunde die Kennlinien und kontinuierlich die Leistung, die Einstrahlung und die Modultemperatur gemessen.

Im Rahmen einer Kooperation prüft unser Partner, das VDE-Institut, die elektrische Sicherheit nach IEC 61730 und stellt nach erfolgreichem Abschluss aller relevanten Prüfungen das Bauart-Zertifikat aus. Neben den IEC-konformen Prüfungen führen wir für FuE-Projekte und nach Kundenwunsch individuelle Prüfungen und Prüfsequenzen durch.

www.testlab-pv-modules.com.



PRÜFEN UND MITGESTALTEN AM TESTLAB SOLAR THERMAL SYSTEMS

Das TestLab Solar Thermal Systems ist eine durch DIN CERTCO, CERTIF und SRCC anerkannte Prüfstelle und durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) voll akkreditiert (ISO 17025). Wir prüfen Sonnenkollektoren, Speicher sowie Komplettsysteme und unterstützen damit unsere Kunden weltweit bei der Entwicklung von solarthermischen Anlagenkomponenten.

Sven Fahr, Andreas Jung, **Korbinian Kramer**, Stefan Mehnert, Rahel Ott, Jens Richter, Arim Schäfer, Wolfgang Striewe, Christoph Thoma, Werner Platzer

Wir begleiten unsere Kunden bei der Produktzertifizierung, z. B. für das europäische Qualitätslabel Solar Keymark oder das amerikanische Qualitätslabel der Solar Rating and Certification Corporation SRCC. Bei Aufträgen zur Vorbereitung einer solchen Zertifizierung bieten wir auch Produktionsinspektionen vor Ort an.

Nach den Erweiterungen der Testkapazitäten und der erfolgreichen Inbetriebnahme konnten 2010 im TestLab Solar Thermal Systems mit neuen Prüfaktivitäten begonnen werden. Aufgrund der Marktentwicklung wurde ein Fokus auf die Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen gelegt sowie eine erste Prototypmessung aufgebaut.

Ebenfalls ein wichtiges Thema war 2010 das Testen von Wärmerohren (Heat Pipe), hier konnte ein Teststand zur Überprüfung des Ansprechverhaltens sowie der übertragenen Leistung fertig gestellt werden.

Erstmals umgesetzt wurden vergleichende Untersuchungen zu PVT-Kollektoren. Damit steht für viele Varianten dieser Technologie eine Methodik zur Charakterisierung im TestLab Solar Thermal Systems zur Verfügung.

1 A/B *Freilufttest im Rahmen der Komplettprüfung von solarthermischen Kollektoren im TestLab Solar Thermal Systems.*

Abgeschlossen wurden die intensiven und langjährigen Arbeiten an unserem Solar-Luft-Kollektor Teststand. Hier ist nun eine technische Charakterisierung ähnlich wie für flüssigkeitsführende Kollektoren möglich.

Systemuntersuchungen nach DIN EN 12976-1,2:2006 können weiterhin an bis zu vier vollständig aufgebauten Warmwasseranlagen parallel durchgeführt werden. Das Labor bietet zusätzlich die Möglichkeiten, Speichervermessung nach DIN EN 12977-3:2008 durchzuführen.

Seit 2002 betreiben wir im TestLab Solar Thermal Systems einen Solarsimulator. Dank der herausragenden Wiederholgenauigkeit können wir gezielte Entwicklungsarbeiten von Kollektorkonstruktionen sehr effizient durchführen.

In Kombination mit unserem Präzisionstracker konnten wir 2010 unseren Mitteltemperatur-Teststand einsetzen, um Wirkungsgradkennlinien mit Arbeitspunkten bis zu 200 °C zu bestimmen. Dadurch sind im TestLab Solar Thermal Systems experimentelle Entwicklungsarbeiten zu konzentrierenden Prozesswärmekollektoren (z. B. für solarthermisch angetriebene Klimatisierung) möglich.

2010 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.



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 Solarenergie-nutzung (mit PV und/oder Solarthermie) bieten wir eine umfassende Charakterisierung an, die auch die Wechselwirkung zwischen Ertrag, Komfort und passiven Solar-gewinnen berücksichtigt. Außerdem verfügen wir über einen Tageslicht-Container und einen Außenprüfstand.

Ulrich Amann, Johannes Hanek, Angelika Helde,
Tilmann Kuhn, Werner Platzer, Jan Wienold,
Helen Rose Wilson

Wir charakterisieren transparente und transluzente Materialien. Wir prüfen Bauteile, z. B. Verglasungen, und wir bewerten die energetischen, thermischen und optischen Eigenschaften von kompletten Fassaden. Folgende Prüfstände stehen zur Verfügung:

- Solarkalorimeter zur Bestimmung des Gesamtenergie-durchlassgrads (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 Gesamtenergiegrads (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 (Gesamtenergiegrad) 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.



QUALITÄTSSICHERUNG VON PV-KRAFTWERKEN

Das Fraunhofer ISE leistet seit 1990 mit seinen professionellen Dienstleistungen einen wichtigen Beitrag zur Qualitätssicherung von Photovoltaik-Kraftwerken. Um den vorausgesagten Ertrag eines PV-Kraftwerks über die gesamte Laufzeit sicherzustellen, ist eine umfassende Qualitätssicherung erforderlich. Das Fraunhofer ISE bietet dafür ein breites Maßnahmenpektrum an.

Klaus Kiefer, Anselm Kröger-Vodde, Frank Neuberger, Nicole Römer, Andreas Steinhüser

Ertragsgutachten

Auf dem Weg zu optimalen Erträgen ist das unabhängige Ertragsgutachten ein unerlässlicher erster Schritt. Unsere Ertragsprognose zum Beurteilen einer PV-Anlage umfasst zwei wesentliche Kriterien: den spezifischen Ertrag für den jeweiligen Standort und die Performance Ratio zum Bewerten der eingesetzten Technik. Durch unser Hintergrundwissen und mit der Erfahrung aus der Charakterisierung der Komponenten aus unseren Messlaboren können wir die Angaben entsprechend einschätzen und bewerten. Unsere Prognosen vergleichen wir regelmäßig mit den Messergebnissen aus unserem langjährigen Monitoring.

Modulmessungen

Über eine Betriebszeit von 20 Jahren bedeutet eine um ein Prozent geringere Modulleistung bei einer Megawattanlage bereits einen Verlust von rund 100 000 Euro. Für Investoren und Betreiber bieten wir daher eine statistisch repräsentative Leistungsmessung der Solarmodule im Callab PV Modules (s. S. 119) an, damit schon vor der Installation der Anlage mögliche Abweichungen erkannt werden. Zur Auswahl der Module aus der »Flashliste« des Herstellers haben wir ein spezielles Verfahren entwickelt, das mit sehr geringen Modulmengen (im Bereich von 1 %) eine fundierte Aussage über die Leistungsfähigkeit sämtlicher Module ermöglicht.

1 10 MW_p Solarkraftwerk in Masdar, Abu Dhabi.

Anlagenprüfung

Damit wir sicher sein können, dass die Anlage unserer Kunden auch wirklich dem Stand der Technik entspricht und die versprochene Leistung erbringt, bieten wir eine umfangreiche Vollprüfung der gesamten Anlage an. So können rechtzeitig entsprechende Gegenmaßnahmen getroffen und mögliche Ansprüche gegen Systemlieferanten bzw. Hersteller gefordert werden. Die Prüfung umfasst die generelle Feststellung von Mängeln sowie die Erfassung von Abweichungen zu den Angaben in den Ertragsgutachten. Für die Leistungsüberprüfung des Solargenerators werden die Kennlinien von Teilgeneratoren bzw. einzelnen Strängen des Solargenerators gemessen. Die sicherheitsrelevanten Prüfungen werden von unserem Kooperationspartner VDE vorgenommen. Unsere Prüfverfahren und Prüfberichte sind von Investoren und Banken international anerkannt.

Qualitätsmonitoring

Eine unabhängige Bestätigung der Qualität und Leistungsfähigkeit von PV-Produkten bzw. -Anlagen ist für Banken und Investoren von hoher Relevanz. Hierfür bieten wir Herstellern und Projektentwicklern zuverlässige und präzise PV-Monitoring-Lösungen an. Mit unseren Experten erstellen wir qualifizierte Fehlermeldungen und hochwertige Analysen der Betriebsbereiche der Anlagenkomponenten. Resultat ist die frühzeitige Erkennung eines nicht optimalen Betriebs und somit die Sicherung wertvoller Erträge. Große Projektentwickler haben durch kontinuierliche Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE die Performance ihrer Anlagen deutlich steigern können – dokumentiert durch Vergleiche der Performance Ratio eigener Anlagen und jener von über 100 weiteren vergleichbaren Anlagen im betriebseigenen Monitoring.



CHARAKTERISIERUNG UND TESTS VON BATTERIEN UND BATTERIESYSTEMEN

Wir testen und prüfen für Hersteller, Systemintegratoren und Anwender Batterien und Batteriesysteme aller gängigen Technologien und Ausführungen. Hierzu stehen frei programmierbare Batterietestgeräte zur Verfügung, mit denen frei wählbare Lade- und Lastgänge gefahren werden können. Unser Spektrum reicht von Kleinzellen für den Consumer-Bereich bis zum Test von Batteriesystemen für den automobilen Einsatz. Wir verfügen über umfangreiche Erfahrung in elektrischer und thermischer Charakterisierung.

Georg Bopp, **Stephan Lux**, Stefan Rinne,
Simon Schwunk, Matthias Vetter

Batterietechnologien

Für solare Systeme und für Starterbatterien in Kraftfahrzeugen werden überwiegend spezielle Bleibatterien genutzt. Für tragbare und mobile Anwendungen finden NiCd-, NiMH- und Li-Ionen-Zellen Verwendung. In Hybrid- und Elektrofahrzeugen kommen zumeist Batteriesysteme auf Basis von Lithium-Ionen-Zellen oder NiMH-Zellen mit komplexer Steuerelektronik oder so genannte Zebra-Batterien zum Einsatz. Für kurzfristige Peakströme, z. B. zur Pufferung der Anfahrleistung von Antrieben, werden Doppelschichtkondensatoren eingesetzt. Für alle diese Technologien sind in unserem Batterielabor Testeinrichtungen vorhanden, in denen nach Vorschriften einschlägiger Institutionen (DIN, IEC, PVGAP u. a.) oder nach kundenspezifisch angepassten Prozeduren Tests von hoher Komplexität durchgeführt werden.

Testbedingungen

Wir testen Batterien im Wasserbad oder in der Klimakammer und können so die gewünschten Umgebungsbedingungen sicherstellen. Für den Test von Lithium-Ionen-Zellen und Batteriesystemen stehen aus Sicherheitsgründen Klimakammern mit inerter Testumgebung zur Verfügung.

1 In der Klimakammer können Wirkungsgrad und Kapazität sowie das Alterungs- und Ladeverhalten der Batteriespeicher unter variablen Bedingungen getestet werden.

2 Im Leistungsprüfstand werden Batteriesysteme bis zu einer Leistung von 250 kW in einer inertisierten Sicherheitstemperaturkammer getestet.

Langzeittests

Für Lebensdauertests von Batterien und -systemen bieten wir auch mehrmonatige Langzeittests an, in denen frei wählbare Lastgänge und Temperaturprofile gefahren werden können.

Automotive-Bereich

Im automobilen Bereich wird aktuell die Elektrifizierung des Antriebsstrangs vorangetrieben. Wichtiger Teil sind hierbei Batteriesysteme, die aus NiMH- bzw. Lithium-Ionen-Zellen samt Steuerelektronik, Kühlung und Schutzgehäuse bestehen. Unser Prüflabor ist in der Lage, Systeme bis zu einer Leistung von 250 kW bei Strömen bis zu 600 A und Spannungen bis zu 1000 V zu vermessen. Dabei können die Prüflinge über einen CAN-Bus angesteuert und mit standardisierten oder frei vorgegebenen Fahrzyklen beaufschlagt werden. Das Batteriesystem ist während dieser Prüfung aus Sicherheitsgründen in einer mit Inertgas versehenen Klimakammer mit zusätzlichem Löschsystem untergebracht.

Zudem bieten wir klassische Tests im Bereich der Starterbatterien wie Kaltstarttests an.



CHARAKTERISIERUNG UND TESTS VON BELEUCHTUNGSSYSTEMEN

Wir testen und prüfen für Hersteller, Systemintegratoren und Anwender Leuchtmittel und Beleuchtungssysteme aller gängigen Technologien und Ausführungen. Unsere Laborausstattung ist speziell auf die Anforderungen von photovoltaisch versorgten Beleuchtungssystemen kleiner Leistung ausgelegt. Darüber hinaus können auch netzversorgte Standard-Leuchtmittel und Leuchten vermessen werden. Im Vordergrund steht dabei immer das System, also Leuchtmittel mit elektronischer Ansteuerung und optischer Peripherie.

Georg Bopp, Stephan Lux, **Norbert Pfanner**

Leuchtmittel

Für solare Beleuchtungssysteme werden heute verstärkt LED (Lichtemittierende Dioden) eingesetzt. Lange Lebensdauern und eine herausragende Effizienz prädestinieren die LED als Leuchtmittel für solarversorgte Beleuchtungssysteme. Die einfache Skalierbarkeit in der elektrischen Leistung ermöglicht völlig neue Leuchtdesigns und erlaubt auch die Herstellung von Leuchten kleinster Leistung, die als kostengünstige Alternative zu Petroleumlampen einsetzbar sind. Wird mehr Lichtleistung benötigt – z. B. um den Anforderungen in Solar Home Systemen zu genügen –, werden derzeit weiterhin Leuchtstofflampen und Kompaktleuchtstofflampen eingesetzt. Unsere Laborinfrastruktur ist daher für die Charakterisierung beider Leuchtmitteltechnologien ausgelegt.

Charakterisierung

Wir führen präzise Messungen lichttechnischer Größen an Leuchtmitteln, Leuchten und Beleuchtungssystemen durch, darunter die Messung des Lichtstroms, der Lichtausbeute und der Beleuchtungsstärkeverteilung (z. B. auf Tischebene) sowie Untersuchungen des lichttechnischen Betriebsverhaltens unter verschiedenen Umgebungsbedingungen (z. B. Änderung der Betriebsspannung und Umgebungstemperatur). Wir erfassen

1 *Kugelphotometer des Lichtlabors zur Erfassung des Lichtstroms und der Lichtausbeute sowie des Langzeitverhaltens von Lichtquellen und Leuchten.*

2 *PV-versorgte Leuchten für die Charakterisierung im Lichtlabor.*

ebenfalls die elektrischen Eigenschaften von Betriebselektronik und Vorschaltgeräten wie Wirkungsgrad, Betriebsführungsverhalten und Fehlerverhalten.

Langzeittests

LEDs schlechter Qualität zeigen eine rasche Degradation der Lichtabgabe, während Leuchtstofflampen empfindlich auf Schaltvorgänge reagieren und durch Vorschaltgeräte geringer Qualität an Lebensdauer verlieren. Für beide Leuchtmitteltechnologien stehen spezielle Langzeitteststände im Lichtlabor zur Verfügung.

Apparative Ausstattung

Auf der lichttechnischen Seite stehen uns zur Verfügung: softwaregesteuerter Lichtmessstand mit einem Kugelphotometer mit 1,50 m Durchmesser, Spektrometer für den VIS Bereich, Leuchtdichtkamera, Luxmeter und Teststände für die Erfassung des Langzeitverhaltens. Für die Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften: breitbandige, präzise Wattmeter, Digitaloszilloskope mit Stromzangen und galvanisch trennenden Tastköpfen sowie programmierbare, langzeitstabile Stromversorgungen.

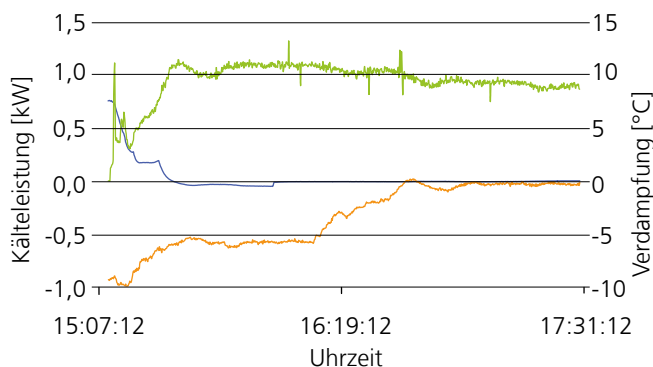


TESTSTANDKAPAZITÄTEN FÜR WÄRMEPUMPEN UND VERDAMPFER

Mit unserem neuen Teststand für Wärmepumpen und Verdampfer liegen erste Praxiserfahrungen vor. Wir können ein breites Leistungsspektrum auf der Nutzseite abdecken – von Heiz- und Kühlleistungen unterhalb 1 kW bei reversiblen Wärmepumpen bis zu 12 kW Heizleistung. Ein weiterer, neu in Betrieb genommener Prüfstand erlaubt spezifische Untersuchungen an neuen Verdampfern. Unsere langjährige Erfahrung nutzen wir nicht nur für die normgerechte Vermessung von Anlagen, sondern können Herstellern auch die Weiterentwicklung ihrer Produkte sowie die Begleitung von Neuentwicklungen anbieten.

Thomas Kramer, Marek Miara, **Thore Oltersdorf**,
Jeannette Wapler, Hans-Martin Henning

Seit den 90er Jahren arbeiten wir an der Verbesserung von Wärmeversorgungsanlagen für Gebäude mit sehr geringem Heizenergiebedarf (Nullenergie- und Passivhäuser und ähnliche energieeffiziente Gebäudeklassen). Ein Schwerpunkt ist die



2 Zeitlicher Verlauf der Kälteleistung in einem Verdampfer für mehrere Wärmequellen, der im Betrieb bei Lufttemperaturen über dem Gefrierpunkt passiv abgetaut werden kann. Dargestellt sind die Leistungen der jeweiligen Wärmequellen Außenluft (blau) und eines simulierten Solarthermie-Kreises (grün) sowie die Verdampfungs-temperatur (orange).

1 Verdampfer mit mehreren Wärmequellen.

Vermessung und Weiterentwicklung von Wärmepumpen mit Luft als Wärmequelle. In groß angelegten Monitoring-Projekten sehr unterschiedlicher Wärmepumpenanlagen haben wir Kompetenzen bei der Systembeurteilung vorhandener Geräte erheblich ausgebaut. Auf dieser Basis und durch den Einsatz mächtiger Auslegungsprogramme für Kältekreise können wir Fachkompetenz zur Optimierung vorhandener Anlagen, aber auch bei der Neuentwicklung von Geräten, anbieten.

Wir haben einen Teststand aufgebaut, mit dem Wärmepumpen im Heizbetrieb und zur Brauchwassererwärmung vermessen werden können. Die Messungen erfolgen gemäß EN 14511 und EN 255-3. Es sind auch Messungen und Erweiterungen unserer Testabläufe möglich gemäß prEN 14825 sowie prEN 16147. Auf unserem Teststand lassen sich die Arbeitsmedien Luft, Sole und Wasser für die Simulation von Wärmequellen und -senken kombinieren. Die Heizleistung zu vermessender Wärmepumpen kann dabei bis zu 4 kW bei Luft-Wasser- und bis zu 12 kW bei Sole-Wasser- oder Wasser-Wasser-Anlagen reichen. Geplant ist eine Erweiterung der Kapazitäten für Luft-Wasser-Anlagen ebenfalls bis zu 12 kW Heizleistung. Unser Fokus bei der Geräteentwicklung liegt im Bereich der Verdampfer, für die im Jahr 2010 ein zusätzlicher Komponententeststand fertig gestellt worden ist. Insbesondere sind dabei solche Konzepte hervorzuheben, die für die Kombination verschiedener Wärmequellen ausgelegt sind. Wir arbeiten hier nicht nur mit klassischen gesteckten Verdampfern, sondern auch mit Konzepten, die die Fertigung und den sicheren Betrieb effizienter gelöteter Verdampfer ermöglicht.

Unsere umfangreichen Monitoring-Projekte liefern Ergebnisse, deren Qualität der Vermessung auf dem Teststand sehr nahe kommt. So können Potenziale für verbesserte Regelungsstrategien praxisnah erschlossen und umgesetzt werden.

ANHANG

128	Gastwissenschaftler
129	Mitarbeit in Gremien
132	Messen
133	Kongresse, Tagungen und Seminare
134	Promotionen
135	Nachwuchsförderung
136	Patente
140	Vorlesungen und Seminare
143	Reviewed Journals
147	Bücher und Beiträge zu Büchern
148	Vorträge
152	Impressum

GASTWISSENSCHAFTLER

M. Sc. Nidal Yacoub Abdalla

National Energy Research Center (NERC)

Amman, Jordanien

19.7.–20.8.2010

Arbeitsgebiet: Simulation solarthermischer Systeme

M. Sc. Natheer Halawani

Lebanese University

Tripolis, Libanon

2.–6.8.2010

Arbeitsgebiet: Simulation solarthermischer Systeme

M. Sc. Haitham M. Adas

National Energy Research Center (NERC)

Amman, Jordanien

1.–29.10.2010

Arbeitsgebiet: Energieeffizienz und Solarthermie

Dr. Walter Mérida

Associate Professor

University of British Columbia, Canada

Clean Energy Research Centre, Faculty of Applied Science

Vancouver, Canada

1.1.–31.12.2010

Arbeitsgebiet: Wassermanagement bei Brennstoffzellen

Matteo Balestrieri

University of Bologna

Bologna, Italien

16.10.2009–30.8.2010

Arbeitsgebiet: Analyse von Silicium-Oberflächen mit SPV

Amada Montesdeoca-Santana

Universidad de La Laguna

Teneriffa, Spanien

1.9.2008–31.7.2011

Arbeitsgebiet: Silicium-Solarzellen

M. Sc. Mrayyan Dea

National Energy Research Center (NERC)

Amman, Jordanien

1.–29.10.2010

Arbeitsgebiet: Energieeffizienz und Solarthermie

Prof. Uwe Nuss

Fachhochschule Offenburg

Offenburg, Deutschland

1.10.2010–31.1.2011

Arbeitsgebiet: Regelung von PV-Wechselrichtern

Karoline Fath

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Karlsruhe, Deutschland

1.11.2010–31.10.2013

Arbeitsgebiet: Lebenszyklusanalyse von gebäude-integrierten

PV-Anlagen

M. Sc. Francesco Passerini

Università degli Studi di Trento

Trento, Italien

16.7.2010–15.4.2011

Arbeitsgebiet: Energieeffiziente Gebäude

Eng. Andrea Frazzica

Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia »Nicola Giordano«

(ITAE)

Messina, Italien

1.–30.6.2010

Arbeitsgebiet: Thermisch betriebene Wärmepumpen (TAS)

MITARBEIT IN GREMIEN

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Mitglied

Alliance for Rural Electrification, Mitglied

Bavaria California Technology Center (BaCaTec), Kuratorium

Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg (BBA-BW), Mitglied und Vorstand

Bundesverband Kraft-Wärme-Kopplung (B.KWK), Mitglied

Bundesverband Solarwirtschaft (BSW)

- Arbeitskreis »Ländliche Elektrifizierung«, Mitglied

CAN in Automation (CiA), Mitglied

CPV-Consortium, Board of Directors, Mitglied

Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V. (DGNB), Mitglied

Deutsche Gesellschaft für Sonnenenergie e. V. (DGS), Mitglied

Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik

Informationstechnik in DIN und VDE (DKE)

- Komitee 373: »Photovoltaische Solarenergiesysteme«

- Komitee 384: »Brennstoffzellen«

- Arbeitsgruppe »Portable Fuel Cell Systems«

- Ad-hoc-Arbeitskreis »Blitz- und Überspannungsschutz für Photovoltaik-Anlagen«

Deutsche Meerwasserentsalzung e. V. (DME), Mitglied

Deutscher Kälte- und Klimatechnischer Verein e. V. (DKV), Mitglied

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e. V., Mitglied

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN)

- Fachnormenausschuss Heiz- und Raumlufttechnik (NHRS AA1.56) »Solaranlagen«, Mitglied

- Fachnormenausschuss Lichttechnik (FNL 6)

»Innenraumbeleuchtung mit Tageslicht«, Mitglied

- Fachnormenausschuss Lichttechnik (FNL 21)

»Spiegelmaterial für die Lichttechnik«, Mitglied

- Normenausschuss Bau (NABau) 00.82.00

»Energetische Bewertung von Gebäuden«, Mitglied

- Gemeinschaftsausschuss (NABauNHRS)

»Energetische Bewertung von Gebäuden«, Mitglied

Dii – Desertec Industrial Initiative, Assoziierter Partner

EU PV Technology Platform

- Working Group »Science, Technology & Applications« (WG3), Mitglied

- Working Group »Developing Countries (WG4)«, Mitglied

Europäisches Komitee für Normung

- CEN TC33/WG3/TG5, Mitglied

- CEN TC129/WG9, Mitglied

- CEN TC312/WG1/WG2/WG3, Mitglied

European Academy, Institute for Renewable Energy (Bolzano/Italy), Mitglied des Scientific Board

European Center for Power Electronics e. V. (ECPE), Mitglied

European H2/FC Technology Platform, Mitglied

European Photovoltaic Industry Association (EPIA), Assoziiertes Mitglied

European Power Electronics and Drivers Association (EPE), Mitglied

European Renewable Energy Research Centres Agency (EUREC), Mitglied

European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF), Mitglied

Expertenkommission der Bundesregierung »Forschung und Innovation«, Mitglied

Fachausschuss Tageslicht der Lichttechnischen Gesellschaft (LitG), Mitglied

Fachinstitut Gebäude-Klima (FGK)

- Arbeitskreis »Expertenkreis Klimaschutz«, Mitglied

MITARBEIT IN GREMIEN

Fachverband Transparente Wärmedämmung e. V., Mitglied

FitLicht – Fördergemeinschaft innovative Tageslichtnutzung,
Mitglied

Fördergesellschaft Windenergie und andere Erneuerbare Energien
(FGW) e. V.

- Arbeitskreis »Photovoltaik«, Mitarbeit
- Arbeitsgruppe »Oberschwingungen«, Mitarbeit

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE), Mitglied

Fraunhofer-Allianz Bau, Mitglied

Fraunhofer-Allianz Energie, Geschäftsführung und Sprecher

Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie, Mitglied

Fraunhofer-Allianz Optic Surfaces, Mitglied

Fraunhofer-Allianz Photokatalyse, Mitglied

Fraunhofer-Allianz SysWasser, Mitglied

Fraunhofer-Netzwerk Batterien, Mitglied

Fraunhofer-Netzwerk Elektrochemie, Mitglied

Fraunhofer-Netzwerk Energiespeichersysteme und Netze, Mitglied

Fraunhofer-Netzwerk Intelligente Energienetze, Koordination

Fraunhofer-Netzwerk Nachhaltigkeit, Mitglied

Fraunhofer-Netzwerk Windenergie, Mitglied

Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität, Mitglied

Fraunhofer-Themenverbund Werkstoffe und Bauteile, Mitglied

Freiburger Verein für Arbeits- und Organisationspsychologie,
Vorstand

Fuel Cell Europe, Mitglied

German Scholars Organization (GSO), Präsident

Gesellschaft für Umweltsimulation (GUS)

- Arbeitskreis »Batterieprüfung«, Mitglied

Global Village Energy Partnership (GVEP), Mitglied

International Advisory Committee of EUPVSEC, Mitglied

International Advisory Committee of SIMC, Mitglied

International Commission on Illumination CIE

- TC 3-39 »Discomfort Glare from Daylight in Buildings«, Mitglied
- TC 3-4 »Climate-Based Daylight Modelling«, Mitglied

International Electrotechnical Commission IEC

- TC82 »Concentrator Modules«, WG7, Mitglied
- TC105 »Fuel Cell Technologies«, WG 7/WG 11, Mitglied

International Energy Agency IEA, Mitglied:

Solar Heating & Cooling Programme SHCP

- Task 44 »Solar and Heat Pump Systems – Systems Using Solar Thermal Energy in Combination with Heat Pumps«
- Task 43 »Solar Rating and Certification Procedure – Advanced Solar Thermal Testing and Characterization for Certification of Collectors and Systems«
- Task 33/34 »Solar Heat for Industrial Processes«
- Task 37 »Advanced Housing Renovation«
- Task 38 »Solar Air-Conditioning and Refrigeration«
- Task 39 »Polymeric Materials for Solar Thermal Applications«
- Programme ECBCS
- Annex 47 »Cost Effective Commissioning«, Energy Conservation Through Energy Storage Programme ECES
- Annex 18 »Transportation of Energy Utilizing Thermal Energy Storage Technology«, Heat Pump Programme HPP
- Annex 32 »Economical Heating and Cooling Systems for Low Energy Houses«
- Annex 34 »Thermally Driven Heat Pumps«

IEA Implementing Agreement Solar Power and Chemical Energy Systems SOLARPACES

- *Task I »Solar Thermal Electric Systems«*
- *Task III »Solar Technology and Advanced Applications«*

International Organization for Standardization ISO, TC180/SC4, Mitglied

International Programme Committee of GADEST, Mitglied

International Science Panel on Renewable Energies (ISPRE), Vorsitzender

Intersolar North America, Programme Committee, Vorsitz

Kompetenzfeld Photovoltaik NRW, Mitglied

Kompetenznetzwerk Brennstoffzelle NRW, Mitglied

Leibniz-Institut für Kristallzüchtung IKZ, Beirat

Lichttechnische Gesellschaft, Mitglied

M&EED Monitoring and Evaluation Working Group by Global Village Energy Partnership (GVEP) and European Union Energy Initiative (EUEI), Mitglied

Mikrosystemtechnik Baden-Württemberg (MST-BW), Beirat

Scientific Commission to the ENI Science and Technology Award, Mitglied

SEMI International, Board of Directors, Mitglied

SEMI® Standards, Photovoltaic Equipment Interface Specification Task Force (PV-EIS), Mitglied

SERIS, Beirat

Stiftung Solarenergie, Beirat

Symposium Photovoltaische Solarenergie, Wissenschaftlicher Beirat

VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung

- *Richtlinienausschuss 4706 »Kriterien für das Innenraumklima«*
- *Richtlinienausschuss 4650, Blatt 1 und Blatt 2*
- *Richtlinienausschuss 4645*
- *Richtlinienausschuss 2164 – Latentspeichersysteme*

VDMA – The German Engineering Federation

- *Productronics Association, Mitglied*
- *Deutsches Flachdisplay-Forum (DFF), Mitglied*
- *Organic Electronics Association (OE-A), Mitglied*

VDMA Brennstoffzellen

- *Arbeitskreis »Industriernetze«, Mitglied*
- *Arbeitskreis »Industriepolitik«, Mitglied*

Verband zu Energieeffizienz in Gebäuden, Gründungsmitglied

Verein Deutscher Ingenieure (VDI)

VDI-Gesellschaft Energietechnik

- *Fachausschuss »Regenerative Energien« (VDI-FA-RE), Mitglied*

VMPA – Verband der Materialprüfämter e. V.

- *Sektorgruppe »Türen, Fenster und Glasprodukte«, Mitglied*

Weiterbildungszentrum WBZU »Brennstoffzelle«, Mitglied im Aufsichtsrat

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung ZSW, Kuratorium

MESSEN

Elektromobile Stadt
Stuttgart, 21.1.2010

25. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI)
Kloster Banz, Bad Staffelstein 3.–5.3.2010

Battery Japan – 1st International Rechargeable Battery Expo
Tokyo, Japan, 3.–5.3.2010

FC Expo – 6th International Hydrogen & Fuel Cell Expo
Tokyo, Japan, 3.–5.3.2010

6. International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems (CPV-6)
Freiburg, 7.–9.4.2010

HANNOVER MESSE
Hannover, 19.–23.4.2010

EXPO 2010
»Better City – Better Life«
Shanghai, China, 1.5.–31.10.2010

Les Rendez-Vous CARNOT
Lyon, Frankreich, 5./6.5.2010

20. Symposium Thermische Solarenergie (OTTI)
Kloster Banz, Bad Staffelstein, 5.–7.5.2010

World Hydrogen Energy Conference (WHEC)
Essen, 16.–21.5.2010

MS Wissenschaft 2010 – das Energieschiff
deutschlandweit, 18.5.–7.10.2010

Entdeckungen/Discoveries
Insel Mainau, 20.5.–29.8.2010

Intersolar
München, 9.–11.6.2010

Intersolar North America
San Francisco, USA, 13.–15.7.2010

25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (PVSEC)
Valencia, Spanien, 6.–9.9.2010

CLEAN TECH WORLD
Berlin, 15.–19.9.2010

Tag der Energie
Berlin, 24./25.9.2010

f-cell Forum
Stuttgart, 27./28.9.2010

Glasstec / glass technology live
Düsseldorf, 28.9.–1.10.2010

KONGRESSE, TAGUNGEN UND SEMINARE

*Die folgenden Kongresse, Tagungen und Seminare hat
das Fraunhofer ISE 2010 (mit-)organisiert:*

Sixth User Forum Thin-Film Photovoltaics (OTTI)

»Modules – Systems – Applications«

Würzburg, 8./9.2.2010

Workshop SiliconFOREST

*»Fortschritte in der Entwicklung von Solarzellen-Strukturen
und Technologien«*

Falkau, 28.2.–3.3.2010

25. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI)

Kloster Banz, Bad Staffelstein 3.–5.3.2010

*6th International Conference on Concentrating Photovoltaic
Systems (CPV-6)*

Freiburg, 7.–9.4.2010

5th European Conference PV-Hybrid and Mini-Grid (OTTI)

Tarragona, Spanien, 29./30.4.2010

20. Symposium Thermische Solarenergie (OTTI)

Kloster Banz, Bad Staffelstein, 5.–7.5.2010

Power Electronics for Photovoltaics (OTTI-Seminar)

München, 7./8.6.2010

6th PV Industry Forum, Intersolar

München, 7.–11.6.2010

Intersolar Europe Conference

*»Solar Heat for Industrial Processes and Small Scale Power
Co-Generation«*

München, 9.6.2010

35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)

Honolulu, USA, 20.–25.6.2010

Intersolar North America Conference, San Francisco, USA,

13.–15.7.2010

*25th European Photovoltaic Solar Energy Conference
and Exhibition (PVSEC)*

Valencia, Spanien 6.–10.9.2010

*5. Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien
IRES 2010*

Berlin, 22.–24.9.2010

Fraunhofer-Energietage

»Energiekonzept Deutschland – Mit neuer Energie«

Berlin, 23./24.9.2010

*Kick-Off Veranstaltung »Netzintegration und Ladeinfrastruktur –
Mobile Verbraucher im Kontext kommunaler Energieversorgung«,
Forum ElektroMobilität*

Berlin, 6.10.2010

Fachforum »Netzferne Stromversorgung mit Photovoltaik« (OTTI)

Freiburg, 6./7.10.2010

FVEE-Jahrestagung

»Forschung für das Zeitalter der erneuerbaren Energien«

Berlin, 11./12.10.2010

*Solar Summits Freiburg – International Conference on Renewable
and Efficient Energy Use*

*»Solar Mobility – Battery Systems, Fuel Cells and Biofuels for
Sustainable Electromobility«*

Freiburg, 15./16.10.2010

*Brennstoffzellen- und Batterie-Allianz Baden-Württemberg
(BBA-BW)*

Workshop »Batterietechnologie«

Karlsruhe, 28.10.2010

KONGRESS, Forum ElektroMobilität

Berlin, 16./17.11.2010

Workshop on MWT Solar Cell and Module Technology

»A Complete Overview of Research Concepts and Innovations«

Amsterdam, Niederlande, 25.11.2010

PROMOTIONEN

Jan Benick:

»High-Efficiency n-Type Solar Cells with a Front Side Boron Emitter«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 2010

Jan Catoir:

»Entwicklung und Charakterisierung von Kathodenzerstäubungsverfahren für kristalline Silizium-Solarzellen«, Universität Konstanz, Konstanz, 2010

Andreas Fell:

»Modelling and Simulation of Laser Chemical Processing (LCP) for the Manufacturing of Silicon Solar Cells«, Universität Konstanz, Konstanz, 2010

Luca Gautero:

»Evaluation of Cost-Effective Technologies for Highly Efficient Silicon-Based Solar Cells«, École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Lausanne, Schweiz, 2010

Daniela Grote:

»Analyses of Silicon Solar Cells and their Measurement Methods by Distributed Circuit Simulations and by Experiment«, Universität Konstanz, Konstanz, 2010

Wolfgang Guter:

»Optimierung von III-V basierten Hochleistungssolarzellen«, Universität Konstanz, Konstanz, 2010

Raymond Hoheisel:

»Charakterisierung und Optimierung von hocheffizienten III-V Weltraumsolarzellen: Strahlungsresistenz, Spektrum- und Temperaturabhängigkeit«, Universität Konstanz, Konstanz, 2010

Joachim Jaus:

»Entwicklung von photovoltaischen Konzentratormodulen mit Fresnel-Linsen und reflektiver Sekundäroptik«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 2010

Martin Kasemann:

»Infrared Imaging Techniques for Crystalline Silicon Solar Cell Characterization and Production Control: What Photons Tell us about Solar Cells«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 2010

Sinje Keipert-Colberg:

»Multikristalline Siliziumsolarzellen mit Siliziumoxid-Siliziumnitrid-Rückseitenpassivierung«, Christian-Albrechts-Universität, Kiel, 2010

Wolfram Kwapil:

»Alternative Materials for Crystalline Silicon Solar Cells – Risks and Implications«, Universität Konstanz, Konstanz, 2010

Julia Melke:

»Study of the Ethanol Oxidation in Fuel Cell Operation Using X-Ray Absorption Spectroscopy and Electro-chemical Methods«, TU Darmstadt, Darmstadt, 2010

Emily Mitchell: »Emitter-Wrap-Through, Rear-Side Contacting for Crystalline Silicon Thin-Film »Wafer Equivalent« Solar Cells«, New South Wales University, Sydney, Australien, 2010

Gabriel Morin:

»Techno-Economic Design Optimization of Solar Thermal Power Plants«, TU Braunschweig, Braunschweig, 2010

Simon Philipps:

»Analyse und Optimierung von III-V Solarzellen mittels numerischer Modellierung«, Universität Konstanz, Konstanz, 2010

Philipp Rosenits:

»Electrical Characterisation of Crystalline Silicon Thin-Film Material«, Universität Konstanz, Konstanz, 2010

NACHWUCHSFÖRDERUNG

Das Fraunhofer ISE ist auch beim Recruiting von Nachwuchskräften aktiv. Mit unterschiedlichen Veranstaltungen, die von unseren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aktiv unterstützt werden, möchten wir Kinder und Jugendliche für das Thema erneuerbare Energien begeistern und frühzeitig über Ausbildungs- und Berufsmöglichkeiten informieren.

2010 hat sich das Fraunhofer ISE an den Science Days in Rust beteiligt und Schulklassen mit Exponaten zum Anfassen und Experimenten zum Mitmachen an das Thema Solarenergie herangeführt. In Kooperation mit der Initiative Solare Zukunft e. V. waren wir bei der Ausstellung »Entdeckungen – Discoveries« auf der Insel Mainau vertreten und über mehrere Monate zu Gast bei Schulklassen. Zum bundesweiten Girl's Day luden wir interessierte Mädchen in unsere Labors in Freiburg ein, an der Kreativwoche der Kulturakademie der Stiftung Kinderland Baden-Württemberg sowie an den Forschertagen Freiburg haben wir ebenfalls teilgenommen.

PATENTE

ERTEILTE PATENTE

Transportvorrichtung und Verfahren zum Transport von zu prozessierenden Elementen durch eine Hochtemperaturzone

*Biro, Daniel; Wandel, Gernot; Lenz, Reinhard; Völk, Peter
CA 2,380,261 C*

Verfahren und Vorrichtung zur Werkstücktrocknung und/oder Trockenhaltung bei der flüssigkeitsstrahlgeführten Bearbeitung eines Werkstücks

*Kray, Daniel
CH 700 816 B1*

Schutzschalteinrichtung für ein Solarmodul

*Burger, Bruno; Schmidt, Heribert
CN 101180781 B*

Solarzellenmodul für konzentrierende Solarsysteme mit einer Vielzahl von Solarzellen auf einem flächig mit einer Metallschicht beschichteten Substrat und Verfahren zu seiner Herstellung

*Jaus, Joachim; Bett, Andreas; Bösch, Armin; Dimroth, Frank; Lerchenmüller, Hansjörg
DE 10 2005 035 672 B4*

Verfahren zur Rekristallisierung von Schichtstrukturen mittels Zonenschmelzen und dessen Verwendung

*Reber, Stefan; Eyer, Achim; Haas, Fridolin
DE 10 2005 043 303 B4, EP 1 924 724 B1, US 7,713,848 B2*

Verfahren zum Materialabtrag an SI-Festkörpern und dessen Verwendung

*Mayer, Kuno; Hopman, Sybille; Kray, Daniel;
Kolbesen, Bernd O.
DE 10 2006 003 605 B4*

Brennstoffzellenmodul und dessen Verwendung

*Wolff, Andreas; Trantz, Marco; Jungmann, Thomas;
Oszcipok, Michael
DE 10 2006 048 860 B4*

Verfahren zur induktiven Messung eines Schichtwiderstandes einer in einem multikristallinen Halbleiterwafer eingebrachten Dotierungsschicht

*Spitz, Meinrad; Rein, Stefan
DE 10 2007 040 650 B4*

Verfahren zur Herstellung einer Metallstruktur auf einer Oberfläche eines Halbleitersubstrates

*Mingirulli, Nicola; Biro, Daniel; Schmiga, Christian; Specht, Jan;
Stüwe, David
DE 10 2008 029 107 B4*

Verfahren zum Transport von Wärme, Transportsystem für einen Wärmeträger sowie dessen Verwendung

*Hermann, Michael; Gschwander, Stefan
DE 10 2008 048 655 B4*

Trennschaltung für Wechselrichter

*Burger, Bruno; Schmidt, Heribert
DE 10 2008 048 841 B3*

Verfahren zur lichtinduzierten galvanischen Pulsabscheidung zur Verstärkung von Metallkontakten von Solarzellen, Anordnung zur Durchführung des Verfahrens und Verwendung

*Radtke, Valentin; Bartsch, Jonas; Hörteis, Matthias
DE 10 2008 053 621 B4*

Verfahren zur simultanen Mikrostrukturierung und Passivierung

*Mayer, Kuno; Kray, Daniel
DE 10 2009 004 902 B3*

Verfahren zum Materialabtrag an Festkörpern und dessen Verwendung

*Mayer, Kuno; Kolbesen, Bernd O.; Kray, Daniel;
Hopman, Sybille
EP 1 979 122 B1*

Adsorbens und dessen Verwendung in Wärmespeichern und Wärmepumpen

*Brovchenko, Ivan; Oleinikova, Alla; Geiger, Alfons;
Schmidt, Ferdinand
EP 2 049 248 B1*

Wechselrichter sowie Verfahren zum Umwandeln einer elektrischen Gleichspannung in einen Wechselstrom

*Schmidt, Heribert; Siedle, Christoph; Ketterer, Jürgen
EP 2 086 102 B1*

VERÖFFENTLICHTE ANMELDUNGEN

Protonenleitende Polymermembran sowie Verfahren zu deren Herstellung

Hahn, Robert; Wagner, Stefan; Schmitz, Andreas
US 7,655,342

System mit Verglasungselement und Gasversorgungsvorrichtung

Graf, Wolfgang; Rox, Rainer
US 7,774,997 B2

Verfahren zur gleichzeitigen Rekristallisierung und Dotierung von Halbleiterschichten und nach diesem Verfahren hergestellte Halbleiterschichtsysteme

Reber, Stefan
US 7,838,437 B2

Vorrichtung und Verfahren zur kontinuierlichen Gasphasenabscheidung unter Atmosphärendruck und deren Verwendung

Reber, Stefan; Hurrle, Albert; Schillinger, Norbert
ZL 200680034544.3

Verfahren zur lokalen Kontaktierung und lokalen Dotierung einer Halbleiterschicht

Preu, Ralf; Grohe, Andreas; Biro, Daniel; Rentsch, Jochen; Hofmann, Marc; Wolf, Andreas; Nekarda, Jan-Frederik
DE 10 2008 044 882 A1

Verfahren zur Messung der Lumineszenzstrahlung einer Halbleiterstruktur

Giesecke, Johannes
DE 10 2008 044 883 A1

Verfahren zur lichtinduzierten galvanischen Pulsabscheidung zur Verstärkung von Metallkontakten von Solarzellen, Anordnung zur Durchführung des Verfahrens und Verwendung

Radtke, Valentin; Bartsch, Jonas; Hörteis, Matthias
DE 10 2008 053 621 A1

Thermopneumatisches Mikroventil auf Basis von Phasenwechselmaterial

Lenz, Bettina; Bromberger, Kolja
DE 10 2008 054 220 A1

Stapelsolarzelle mit reflektierender Zwischenschicht sowie Anordnung dieser Solarzellen

Niggemann, Michael; Zimmermann, Birger
DE 10 2009 019 937 A1

Mischvorrichtung für Fluide und deren Verwendung sowie Mischverfahren

Aicher, Dr. Thomas; Schaadt, Achim; Voglstätter, Christopher; Full, Johannes
DE 10 2009 019 938 A1

Photovoltaisches Modul mit flächigem Zellverbinder

Wirth, Harry; Wagner, Hans-Ulrich; Kalmbach, Jens; Hirzler, Bernd; Strebel, Beat
DE 10 2009 023 901 A1

Verfahren zur Herstellung einer einseitig kontaktierbaren Solarzelle

Hermle, Martin; Bivour, Martin; Reichel, Christian
DE 10 2009 040 670 A1

PATENTE

Anpassschaltung

Schmidt, Heribert; Burger, Bruno

DE 10 2009 051 186 A1

Verfahren zur Herstellung von mechanisch vorgespannten Solarzellenverbunden sowie mechanisch vorgespanntes Solarzellenmodul

Wirth, Harry

EP 2 154 728 A2

Verfahren zur Aufschlüsselung des elektrischen Verbrauchs einer Mehrzahl von elektrischen Verbrauchsgeräten und Vorrichtung hierzu

Büttner, Markus

EP 2 237 212 A1

Tunneldioden aus spannungskompensierten Verbindungshalbleiterschichten

Guter, Wolfgang; Dimroth, Frank; Schöne, Jan

EP 2 251 912 A1

Metallhaltige Zusammensetzung, Verfahren zur Herstellung von elektrischen Kontaktstrukturen auf elektronischen Bauteilen sowie elektronisches Bauteil

Hörteis, Matthias; Woehl, Robert; Glunz, Stefan;

Filipovic, Aleksander; Schmidt, Daniel

WO 2010/003619 A1

Photovoltaik-Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung einer Konzentratoroptik

Nitz, Peter

WO 2010/012479 A2

Offenes verkapseltes Konzentratorsystem für Solarstrahlung

Löckenhoff, Rüdiger; Bett, Andreas; Wiesenfarth, Maïke;

Segev, Roy

WO 2010/012491 A2

Solarzelle und Verfahren zur Herstellung einer Solarzelle

Clement, Florian; Biro, Daniel; Menkö, Michael; Kubera, Tim

WO 2010/015310 A3

Verfahren zur Bestimmung der Rekombinationseigenschaften an einem Messteilbereich einer Messseite einer Halbleiterstruktur

Kasemann, Martin; Hermle, Martin; Granek, Filip

WO 2010/022874 A1

Solarzelle und Solarzellenmodul mit einseitiger Verschaltung

Biro, Daniel; Mingirulli, Nicola; Clement, Florian; Preu, Ralf;

Woehl, Robert

WO 2010/022911 A2

Verfahren zur Bestimmung der Überschussladungsträgerlebensdauer in einer Halbleiterschicht

Rosenits, Philipp; Roth, Thomas; Glunz, Stefan

WO 2010/022922 A1

Messverfahren für eine Halbleiterstruktur

Würfel, Peter; Schubert, Martin; Kasemann, Martin; Warta, Wilhelm

WO 2010/022962 A1

Brennstoffzellenanordnung und Verfahren zu deren Herstellung

Zscheschang, Eva; Gerteisen, Dietmar; Zedda, Mario;

Ackermann, Volker

WO 2010/022965 A1

Heterosolarzelle und Verfahren zur Herstellung von Heterosolarzellen

Pysch, Damian; Glunz, Stefan

WO 2010/025809 A2

Trennschaltung für Wechselrichter

Burger, Bruno; Schmidt, Heribert

WO 2010/034413 A1

Verfahren zum Transport von Wärme, Transportsystem für einen Wärmeträger sowie dessen Verwendung

Hermann, Michael; Gschwander, Stefan

WO 2010/034482 A2

Verfahren zur mechanischen Charakterisierung von Produktionsmaschinen für sprödbrechende Materialien

Kray, Daniel; Bagdahn, Jörg; Schönfelder, Stephan

WO 2010/040530 A1

Mikroventil in keramischer Mehrlagentechnik sowie dessen Verwendung

Lenz, Bettina; Bromberger, Kolja

WO 2010/049092 A1

Verfahren zum Transport von Flüssigkeiten, Thermo-Kapillar-Pumpe sowie deren Verwendung

Lenz, Bettina; Bromberger, Kolja

WO 2010/049122 A2

Tandemsolarzelle aus kristallinem Silizium und kristallinem Siliziumcarbid sowie Verfahren zu dessen Herstellung

Janz, Stefan; Reber, Stefan

WO 2010/057613 A2

Apparat zur Verteilung von Fluiden und deren Wärme- und/oder Stoffaustausch

Henning, Hans-Martin; Bongs, Constanze;

Hermann, Michael

WO 2010/069602 A2

Solarzelle und Verfahren zur Herstellung einer Solarzelle aus einem Siliziumsubstrat

Biro, Daniel; Schultz-Wittmann, Oliver; Lemke, Anke;

Rentsch, Jochen; Clement, Florian; Hofmann, Marc; Wolf, Andreas;

Gautero, Luca

WO 2010/081505 A2

Verfahren und Vorrichtung zur simultanen Mikrostrukturierung und Passivierung

Mayer, Kuno; Kray, Daniel

WO 2010/081533 A2

Aerosol-Drucker, dessen Verwendung und Verfahren zur Herstellung von Linienunterbrechungen bei kontinuierlichen Aerosol-Druckverfahren

Hörteis, Matthias; Filipovic, Aleksander; Seitz, Christian

WO 2010/089081 A1

Photovoltaic Module and Method for the Production thereof

Wirth, Harry

WO 2010/091889 A2

Vorrichtung und Verfahren zur simultanen Mikrostrukturierung und Dotierung von Halbleitersubstraten

Mayer, Kuno; Krossing, Ingo; Knapp, Carsten; Granek, Filip;

Mesec, Matthias; Rodofili, Andreas

WO 2010/099862 A2

Beidseitig kontaktierte Solarzellen sowie Verfahren zu deren Herstellung

Granek, Filip; Kray, Daniel; Mayer, Kuno; Aleman, Monica;

Hopman, Sybille

WO 2010/099863 A2

Solarzellen mit Rückseitenkontaktierung sowie Verfahren zu deren Herstellung

Granek, Filip; Kray, Daniel; Mayer, Kuno; Aleman, Monica;

Hopman, Sybille

WO 2010/099892 A2

Niedertemperatur-Brennstoffzelle mit integriertem Wassermanagementsystem für den passiven Austrag von Produktwasser

Bromberger, Kolja; König, Christian; Ackermann, Volker

WO 2010/099932 A1

Messvorrichtung zur elektrischen Vermessung einer einseitig an einer Messeite elektrisch kontaktierbaren Messstruktur

Glatthaar, Markus; Rein, Stefan; Biro, Daniel; Clement, Florian;

Menkö, Michael; Krieg, Alexander

WO 2010/102801 A1

Verfahren zum Nachführen eines Solargenerators nach der Sonne, Steuerung für eine Solaranlage und Solaranlage

Burger, Bruno; Stalter, Olivier

WO 2010/103090 A2

Verfahren zur orts aufgelösten Bestimmung des Serienwiderstandes einer Halbleiterstruktur

Glatthaar, Markus; Haunschild, Jonas; Rein, Stefan

WO 2010/133325 A1

Verfahren zur strukturierten Beschichtung von Substraten

Zimmermann, Birger; Niggemann, Michael;

Schleiermacher, Hans-Frieder

WO 2010/136213 A1

VORLESUNGEN UND SEMINARE

Dr. Thomas Aicher

»Chemie«

Vorlesung WS 10/11

Hochschule Offenburg

Studiengang Energiesystemtechnik

Dr. Thomas Aicher, Dr. Tom Smolinka

»Energieverfahrenstechnik«

Vorlesung SS 10

Hochschule Offenburg

Studiengang Elektrotechnik/Informationstechnik^{Plus}

Dr. Dietmar Borchert

»Photovoltaik«

Vorlesung SS 10

TFH Georg Agricola zu Bochum

Fachbereich Maschinentechnik

Prof. Bruno Burger

»Solar-Technologien«

Vorlesung SS 10

Berufsakademie Ravensburg

Studiengang Elektrotechnik-Automatisierungstechnik

Prof. Bruno Burger

»Leistungselektronische Systeme für regenerative Energiequellen«

Vorlesung WS 10/11

Universität Karlsruhe

Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Prof. Bruno Burger

»Green Mobility Engineering – Power Electronics«

Vorlesung WS 10/11

Hector School, Karlsruhe

Dr. Stefan Glunz

»Photovoltaische Energiekonversion«

Vorlesung SS 10

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Technische Fakultät

Dr. Stefan Glunz, Dr. Werner Platzer, Dr. Ralf Preu,

Dr. Christof Wittwer

»Technology I«

Vorlesung WS 09/10

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Zentrum für Erneuerbare Energien (ZEE)

Studiengang Renewable Energy Management (REM)

Dr. Stefan Glunz, Dr. Uli Würfel

»Fundamentals of Solar Cells«

Vorlesung WS 10/11

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Master Online Photovoltaics (MOPV)

Dr. Stefan Henninger, Dr. Peter Schossig

Module »Research Skills«

WS 09/10

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Zentrum für Erneuerbare Energien (ZEE)

Studiengang Renewable Energy Management (REM)

Dipl.-Ing. Florian Kagerer

»Bauökologie/Energie effizientes Bauen«

Vorlesung SS 10

Staatliche Akademie der Bildenden Künste, Stuttgart

Studiengang Architektur

Dr. Peter Kailuweit

»Selected Semiconductor Devices«

Seminar WS 10/11

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Master Online Photovoltaics (MOPV)

Dr. Doreen Kalz

»Wärme- und Raumlufttechnik«

Vorlesung SS 10

Hochschule Offenburg

Studiengang Verfahrenstechnik

Dipl.-Ing. Anton Neuhäuser
»Concentrating Solar Power«
Vorlesung WS 09/10
Technische Universität Berlin
Studiengang Global Production Engineering

Brisa Ortiz
»Hybrid System Simulation«
Seminar SS 10 und WS 10/11
Universität Kassel
European Master in Renewable Energy

Dr. Jens Pfafferott
»Solares Bauen«
Präsenzveranstaltung SS 10 und WS 10/11
Universität Koblenz-Landau
Fernstudiengang Energiemanagement

Dipl.-Ing. Norbert Pfanner
»Solartechnologie«
Vorlesung SS 10
Hochschule Offenburg
Studiengang Elektrotechnik/Informationstechnik^{Plus}

Dr. Werner Platzer
»Elective II – Energy Efficiency and Solar Thermal Energy«
Vorlesungsmodul WS 09/10
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Zentrum für Erneuerbare Energien (ZEE)
Studiengang Renewable Energy Management (REM)

Dr. Werner Platzer
»Thermische Solarenergie«
Präsenzveranstaltung WS 09/10
Universität Koblenz-Landau
Fernstudiengang Energiemanagement

Dr. Ralf Preu
»Elective I – SOLAR ENERGY (PV) Part 2: Production Technology«
Vorlesung SS 10
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Zentrum für Erneuerbare Energien (ZEE)
Studiengang Renewable Energy Management (REM)

Dr. Achim Schaadt
»Energieverfahrenstechnik«
Vorlesung WS 10/11
Hochschule Offenburg
Studiengang Elektrotechnik/Informationstechnik^{Plus}

Prof. Dr. Roland Schindler
»Photovoltaik I« Vorlesung WS 09/10,
»Photovoltaik II« Vorlesung SS 10,
Fernuniversität Hagen
Fakultät für Mathematik und Informatik
Fachrichtung Elektrotechnik und Informationstechnik

Dr. Heribert Schmidt
»Photovoltaische Systemtechnik«
Vorlesung SS 10
Universität Karlsruhe
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Dr. Peter Schossig
»Wärme- und Kältespeicherung in Gebäuden«
Technische Universität München
Blockvorlesung
Lehrstuhl für Bauklimatik und Haustechnik
Studiengang ClimaDesign

Dr. Olivier Stalter
»Fundamentals of PV Systems«
Vorlesung WS 10/11
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Master Online Photovoltaics (MOPV)

VORLESUNGEN UND SEMINARE

Prof. Dr. Eicke R. Weber

»Photovoltaik«

Oberseminar SS 10

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Fakultät für Physik und Mathematik

Prof. Dr. Eicke R. Weber

»Photovoltaik«

Oberseminar WS 10/11

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Fakultät für Physik und Mathematik

Prof. Dr. Eicke R. Weber, Dr. Werner Platzer,

Dipl.-Ing. (FH) Korbinian Kramer

»Solarthermie«

Vorlesung WS 10/11

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Fakultät für Physik und Mathematik

Prof. Dr. Eicke R. Weber, Dr. Uli Würfel

»Photovoltaische Energiekonversion«

Vorlesung SS 10

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Fakultät für Physik und Mathematik

Neben den genannten Lehrtätigkeiten an Hochschulen führen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Fraunhofer ISE auch regelmäßig praxisorientierte Aus- und Weiterbildungsveranstaltungen für interessierte Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus der Wirtschaft und der Industrie durch. So bieten wir z. B. in der Reihe »PV-Training« Seminare und Workshops zur Siliciumtechnologie an oder vermitteln im OTTI-Seminar »Netzferne Stromversorgung« Wissen über Produkte, Planung und Aufbau im Bereich netzferner Stromversorgungssysteme.

REVIEWED JOURNALS

Bartsch, J.; Mondon, A.; Bayer, K.; Schetter, C.; Hörteis, M.; Glunz, S. W.

»Quick Determination of Copper-Metallization Long-Term Impact on Silicon Solar Cells«, in: *Journal of The Electrochemical Society* 157 (2010), No. 10, pp. H942-H946 (online available: <http://dx.doi.org/10.1149/1.3466984>)

Benick, J.; Zimmermann, K.; Spiegelman, J. (RASIRC INC., San Diego, CA, USA); Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Rear Side Passivation of PERC-Type Solar Cells by Wet Oxides Grown from Purified Steam«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (2010) (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1020>)

Breitenstein, O. (Max Planck Institute of Microstructure Physics, Weinheim, Germany); Khanna, A. (Institute of Technology, Uttar Pradesh, India); Warta, W.

»Quantitative Description of Dark Current–Voltage Characteristics of Multicrystalline Silicon Solar Cells Based on Lock-in Thermography Measurements«, in: *physica status solidi (a)* 207 (2010), No. 9, pp. 2159-2163 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201026084>)

Cánovas, E. (Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain); Fuertes Marrón, D. (Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain); Martí, A. (Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain); Luque, A. (Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain); Bett, A. W.; Dimroth, F.; Philipps, S. P.

»Photoreflectance Analysis of a GaInP/GaInAs/Ge Multijunction Solar Cell«, in: *Applied Physics Letters* 97 (2010), No. 20, pp. 203504 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3517255>)

Croze, V. (Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany); Ettinghausen, F. (Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany); Melke, J.; Soehn, M. (Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany); Stuermer, D. (Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany); Roth, C. (Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany)

»The Use of in Situ X-Ray Absorption Spectroscopy in Applied Fuel Cell Research«, in: *Journal of Applied Electrochemistry* 40 (2010), No. 5, pp. 877-883 (online available: <http://dx.doi.org/10.1007/s10800-009-9919-x>)

Erath, D.

»Printing Techniques in the c-Si PV Industry – a Brief Technological Overview«, in: *International Journal of Graphic Education and Research* (2010), No. 3, pp. 8-15

Fell, A.; Hopman, S.; Granek, F.

»Simulation Supported Description of the Local Doping Formation Using Laser Chemical Processing (LCP)«, in: *Applied Physics A: Materials Science & Processing* (2010) (online available: <http://dx.doi.org/10.1007/s00339-010-6089-y>)

Fellmeth, T.; Menkoe, M.; Clement, F.; Preu, R.

»Highly Efficient Industrially Feasible Metal Wrap Through (MWT) Silicon Solar Cells«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94 (2010), No.12, pp.1996-2001 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.07.032>)

Fischer, S.; Goldschmidt, J. C.; Löper, P.; Bauer, G. H. (Carl von Ossietzky University, Oldenburg, Germany); Brüggemann, R. (Carl von Ossietzky University, Oldenburg, Germany); Krämer, K. (University of Bern, Bern, Switzerland); Biner, D. (University of Bern, Bern, Switzerland); Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Enhancement of Silicon Solar Cell Efficiency by Upconversion: Optical and Electrical Characterization«, in: *Journal of Applied Physics* 108 (2010), No. 4, pp. 044912 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3478742>)

Fuentes, R. E. (University of South Carolina, Columbia, SC, USA); Rau, S.; Smolinka, T.; Weidner, J. W. (University of South Carolina, Columbia, SC, USA)

»Bimetallic Electrocatalysts Supported on TiO₂ for PEM Water Electrolyzer«, in: *ECS Transaction*, 28 (2010), No. 26, pp. 23-35 (online available: <http://dx.doi.org/10.1149/1.3501093>)

Gerteisen, D.

»Transient and Steady-State Analysis of Catalyst Poisoning and Mixed Potential Formation in Direct Methanol Fuel Cells«, in: *Journal of Power Sources* 195 (2010), No. 19, pp. 6719-6731 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.04.004>)

REVIEWED JOURNALS

Gerteisen, D.; Sadeler, C.

»Stability and Performance Improvement of a Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cell Stack by Laser Perforation of Gas Diffusion Layers«, in: *Journal of Power Sources* 195 (2010), No. 16, pp. 5252-5257 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.03.021>)

Giesecke, J. A.; Schubert, M. C.; Michl, B.; Schindler, F.; Warta, W.
»Minority Carrier Lifetime Imaging of Silicon Wafers Calibrated by Quasi-Steady-State Photoluminescence«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2010), No. 3, pp. 1011-1018 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.12.016>)

Giesecke, J. A.; Schubert, M. C.; Walter, D.; Warta, W.
»Minority Carrier Lifetime in Silicon Wafers from Quasi-Steady-State Photoluminescence«, in: *Applied Physics Letters* 97 (2010), No. 9, pp. 092109 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3485216>)

Granek, F.; Reichel, C.

»Back-Contact Back-Junction Silicon Solar Cells under UV Illumination«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94 (2010), No. 10, pp. 1734-1740 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.05.038>)

Green, M. A. (ARC Photovoltaics Centre of Excellence, Sydney, Australia); Emery, K. (National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA); Hishikawa, Y. (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki, Japan); Warta, W.

»Solar Cell Efficiency Tables (Version 35)«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18 (2010), No. 2, pp. 144-150 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.974>)

Green, M. A. (ARC Photovoltaics Centre of Excellence, Sydney, Australia); Emery, K. (National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA); Hishikawa, Y. (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST), Tsukuba, Ibaraki, Japan); Warta, W.

»Solar Cell Efficiency Tables (Version 36)«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18 (2010), No. 5, pp. 346-352 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1021>)

Greulich, J.; Glathaar, M.; Rein, S.

»Fill Factor Analysis of Solar Cells' Current-Voltage Curves«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18 (2010), No. 7, pp. 511-515 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.979>)

Gundel, P.; Friedemann, H. D.; Schubert, M. C.; Giesecke, J. A.; Warta, W.

»Quantitative Carrier Lifetime Measurement with Micron Resolution«, in: *Journal of Applied Physics* 108 (2010), No. 3, pp. 033705 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3462433>)

Gundel, P.; Kwapil, W.; Schubert, M. C.; Seifert, H.; Warta, W.

»Approach to the Physical Origin of Breakdown in Silicon Solar Cells by Optical Spectroscopy«, in: *Journal of Applied Physics* 108 (2010), No. 12, pp. 123703 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3517086>)

Gundel, P.; Schubert, M. C.; Heinz, F. D.; Benick, J.; Zizak, I. (Helmholtz-Zentrum BESSY II, Berlin, Germany); Warta, W.

»Submicron Resolution Carrier Lifetime Analysis in Silicon with Fano Resonances«, in: *Physica Status Solidi – Rapid Research Letters* 4 (2010), No. 7, pp. 160-162 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201004170>)

Gundel, P.; Schubert, M. C.; Heinz, F. D.; Kwapil, W.; Warta, W.; Martinez-Criado, G. (European Synchrotron Research Facility (ESRF), Grenoble, France); Manfred, R. (Max Planck Institute for Microstructure Physics, Halle, Germany); Weber, E. R.

»Impact of Stress on Recombination of Metal Precipitates in Silicon«, in: *Journal of Applied Physics* 108 (2010), No. 10, pp. 103707 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3511749>)

Habenicht, H.; Schubert, M. C.; Warta, W.

»Imaging of Chromium Point Defects in P-Type Silicon«, in: *Journal of Applied Physics* 108 (2010), No. 3, pp. 034909 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3459892>)

Hartel, A. M. (IMTEK Faculty of Engineering Albert-Ludwigs-University, Freiburg, Germany); Künle, M.; Löper, P.; Janz, S.; Bett, A. W.

»Amorphous $\text{Si}_x\text{C}_{1-x}\text{:H}$ Single Layers before and after Thermal Annealing: Correlating Optical and Structural Properties«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94 (2010), No. 11, pp. 1942-1946 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.06.014>)

Haunschild, J.; Glatthaar, M.; Demant, M.; Nievendick, J.; Motzko, M.; Rein, S.; Weber, E. R.

»Quality Control of As-Cut Multicrystalline Silicon Wafers Using Photoluminescence Imaging for Solar Cell Production«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 94 (2010), No. 12, pp. 2007-2012 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.06.003>)

Helmers, H.; Eduard, O.; Wolfgang, B. (Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF, Freiburg, Germany); Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Processing Techniques for Monolithic Interconnection of Solar Cells at Wafer Level«, in: *IEEE Transactions on Electron Devices* 57 (2010), No. 12, pp. 3355-3360 (online available: <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2010.2076190>)

Henninger, S. K.; Schmidt, F. P. (Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany); Henning, H.-M.

»Water Adsorption Characteristics of Novel Materials for Heat Transformation Applications«, in: *Applied Thermal Engineering* 30 (2010), No. 13, pp. 1692-1702 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.03.028>)

Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Dry Plasma Processing for Industrial Crystalline Silicon Solar Cell Production«, in: *European Physical Journal Applied Physics* 52 (2010), No. 1, pp. 11101 (online available: <http://dx.doi.org/10.1051/epjap/2010131>)

Hoheisel, R.; Fernandez, J.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Investigation of Radiation Hardness of Germanium Photovoltaic Cells«, in: *IEEE Transactions on Electron Devices* 57 (2010), No. 9, pp. 2190-2194 (online available: <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2010.2053491>)

Hoheisel, R.; Philipps, S. P.; Bett, A. W.

»Long-Term Energy Production of III-V Triple-Junction Solar Cells on the Martian Surface«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 18 (2010), No. 2, pp. 90-99 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.939>)

Jonas, S.; Schubert, M. C.; Warta, W.; Savin, H. (Department of Micro and Nanosciences, Espoo, Finland); Haarahiltunen, A. (Department of Micro and Nanosciences, Espoo, Finland)

»Analysis of Simultaneous Boron and Phosphorus Diffusion Gettering in Silicon«, in: *physica status solidi (a)* 207 (2010), No. 11, pp. 2589-2592 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201026333>)

Kailuweit, P.; Kellenbenz, R.; Philipps, S. P.; Guter, W.; Bett, A. W.; Dimroth, F.

»Numerical Simulation and Modeling of GaAs Quantumwell Solar Cells«, in: *Journal of Applied Physics* 107 (2010), No. 6, pp. 064317-064317-6 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3354055>)

Künle, M.; Kaltenbach, T.; Löper, P.; Hartel, A.; Janz, S.; Eibl, O. (Eberhard Karls Universität, Tübingen, Germany); Nickel, K.-G. (Eberhard Karls Universität, Tübingen, Germany)

»Si-Rich a-SiC:H Thin Films: Structural and Optical Transformations during Thermal Annealing«, in: *Thin Solid Films* 519 (2010), No. 1, pp. 151-157 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2010.07.085>)

Kwapil, W.; Wagner, M. (SolarWorld Innovations GmbH, Freiberg, Germany); Schubert, M. C.; Warta, W.

»High Net Doping Concentration Responsible for Critical Diode Breakdown Behavior of Upgraded Metallurgical Grade Multicrystalline Silicon Solar Cells«, in: *Journal of Applied Physics* 108 (2010), No. 2, pp. 023708 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3463332>)

Peters, M.; Rüdiger, M.; Bläse, B.; Platzer, W.

»Electro-Optical Simulation of Diffraction in Solar Cells«, in: *Optics Express* 18 (2010), No. S4, pp. A584-A593 (online available: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.18.00A584>)

Reichel, C.; Granek, F.; Schultz-Wittmann, O. (TetraSun Inc., USA); Glunz, S. W.

»Comparison of Emitter Saturation Current Densities Determined by Injection-Dependent Lifetime Spectroscopy in High and Low Injection Regimes«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* (2010) (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.942>)

REVIEWED JOURNALS

Saint-Cast, P.; Benick, J.; Kania, D.; Weiss, L.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.; Glunz, S. W.

»High-Efficiency c-Si Solar Cells Passivated with ALD and PECVD Aluminum Oxide«, in: *IEEE Electron Device Letters* 31 (2010), No. 7, pp. 695-697 (online available: <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2010.2049190>)

Schies, A.; Went, J.; Heidtmann, C.; Eisele, M.; Kroemke, F.; Schmoch, H.; Vetter, M.

»Operating Control Strategies and Dimensioning of Photovoltaic-Powered Reverse Osmosis Desalination Plants Without Batteries«, in: *Desalination and Water Treatment* 21 (2010), pp. 131-137 (online available: <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2010.1301>)

Schubert, M. C.; Habenicht, H.; Kerler, M. J.; Warta, W.

»Quantitative Iron Concentration Imaging«, in: *Solid State Phenomena* 156-158 (2010), pp. 407-412 (online available: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.156-158.407>)

Schubert, M. C.; Schön, J.; Gundel, P.; Habenicht, H.; Kwapil, W.; Warta, W.

»Imaging of Metal Impurities in Silicon by Luminescence Spectroscopy and Synchrotron Techniques«, in: *Journal of Electronic Materials* 39 (2010), No. 6, pp. 787-793 (online available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11664-010-1114-7>)

Suwito, D.; Jäger, U.; Benick, J.; Janz, S.; Hermlle, M.; Glunz, S.

»Industrially Feasible Rear Passivation and Contacting Scheme for High-Efficiency n-Type Solar Cells Yielding a V_{oc} of 700 mV«, in: *IEEE Transactions on Electron Devices* 57 (2010), No. 8, pp. 2032-2036 (online available: <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2010.2051194>)

Ulbrich, C. (Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany); Peters, M.; Bläsi, B.; Kirchartz, T. (Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany); Gerber, A. (Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany); Rau, U. (Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany)

»Enhanced Light Trapping in Thin-Film Solar Cells by a Directionally Selective Filter«, in: *Optics Express* 18 (2010), No. S2, pp. A133-A138 (online available: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.18.00A133>)

Went, J.; Kroemke, F.; Schmoch, H.; Vetter, M.

»The Energy Demand for Desalination with Solar Powered Reverse Osmosis Units«, in: *Desalination and Water Treatment* 21 (2010), pp. 138-147 (online available: <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2010.1302>)

Wolf, A.; Biro, D.; Kimmerle, A.; Stumpp, S.; Nekarda, J.; Preu, R.

»Comprehensive Analytical Model for Locally Contacted Rear Surface Passivated Solar Cells«, in: *Journal of Applied Physics*, 108 (2010), No. 12, pp. 124510 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3506706>)

Zimmer, M.; Birmann, K.; Rentsch, J.

»Online Process Control of Alkaline Texturing Baths with Near-Infrared Spectroscopy«, in: *Vibrational Spectroscopy* 53 (2010), No. 2, pp. 269-273 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.vibspec.2010.04.005>)

Alle weiteren Veröffentlichungen finden Sie im Internet unter: www.ise.fraunhofer.de/veroeffentlichungen2010

BÜCHER UND BEITRÄGE ZU BÜCHERN

Bläsi, B.; Gombert, A.; Niggemann, M.

»Microstructured Polymer Surfaces with Complex Optical Functions for Solar Applications«, in: *The Handbook of Environmental Chemistry, Chapter Microstructured Polymer Surfaces with Complex Optical Functions for Solar Applications*, Eyerer, P.; Weller, M.; Hübner, C., Springer, Berlin, Germany, 2010, pp. 263-279, ISBN 978-3-642-02796-3

Jaus, J.

»Entwicklung von photovoltaischen Konzentratormodulen mit Fresnel-Linsen und reflektiver Sekundäroptik«, Dr. Hut, Munich, Germany, 2010, ISBN 978-3868533750

Peters, M. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany);

Bielawny, A. (Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, Germany); Bläsi, B.; Carius, R. (Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany); Glunz, S. W.; Goldschmidt, J. C.; Hauser, H.; Hermle, M.; Kirchartz, T. (Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany); Löper, P.; Üpping, J. (Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, Germany); Wehrspohn, R. (Martin-Luther-Universität, Halle-Wittenberg, Germany); Willeke, G.

»Photonic Concepts for Solar Cells«, in: *Physics of Nanostructured Solar Cells, Chapter 1*, Badescu, V.; Paulescu, M., NOVA, Hauppauge, NY, United States of America, 2010, pp. 1-41, ISBN 978-1-60876-110-4

Schmidt, H.; Burger, B.; Schmid, J. (IWES, Kassel, Germany)

»Power Conducting for Photovoltaic Power Systems«, in: *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd Edition, Chapter 21*, Luque, A.; Hegedus, S., Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2010, pp. 954-983, ISBN 978-0-470-72169-8

Schossig, P.; Haussmann, T.

»Wärme- und Kältespeicherung – Stand der Technik und Perspektiven«, in: *Jahrbuch Energieeffizienz in Gebäuden*, Pöschk, J., VME Verlag und Medienservice Energie, Berlin, Germany, 2010, pp. 183-195, ISBN 978-3-936062-06-9

Smolinka, T.; Rau, S.; Hebling, C.

»Polymer Electrolyte Membrane (PEM) Water Electrolysis«, in: *Hydrogen and Fuel Cells, Chapter 13*, Stolten, D., Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, Germany, 2010, pp. 271-290, ISBN 978-3-527-32711-9

Voss, K. (Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Germany);

Engelmann, P. (Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal, Germany); Wagner, A. (Universität Karlsruhe, Karlsruhe, Germany); Pfafferott, J.

»Energetische Sanierung von Gebäuden – Beispielhafte Erfahrungen und Ergebnisse aus Demonstrationsprojekten des Nichtwohnungsbaus«, in: *Bauphysik-Kalender 2010*, Fouad, N. A., Ernst & Sohn, Berlin, Germany, 2010, pp. 369-391, ISBN-13: 978-3-433-02938-1

Wienold, J.

»Daylight Glare in Offices«, Fraunhofer Verlag, Stuttgart, Germany, 2010, ISBN 978-3-8396-0162-4

Wittwer, C.; Stillahn, T.

»Erzeugung im Wandel – Chancen der Smart-Grid-Technologie«, in: »Intelligente Stromnetze« Euroforum-Lehrgang, EUROFORUM Verlag, Düsseldorf, Germany, 2010, pp. 3-73

VORTRÄGE

Aicher, T.; Szolak, R.; Griesser, L. (Griesser Engineering, Zurich, Switzerland)

»Versatile Fuel Processor – for Oxidative Steam Reforming and (Catalytic Partial) Oxidation«, 18th World Hydrogen Energy Conference 2010, EnergieAgentur.NRW, Essen, Germany, 16.–21.5.2010

Bergmann, A.; Gerteisen, D.; Kurz, T.

»Coupled Multidimensional Modelling of CO Poisoning of a HTPEM Fuel Cell in Dynamic and Steady-State Operation«, 7. MODVAL 2010, EPFL, Lausanne, Switzerland, 23./24.3.2010

Bett, A.

»Development of III-V-Based Solar Cells and Their Applications«, 1st First Turkish Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Solar TR-1, Ankara, Turkey, 29./30.4.2010

Bett, A. W.; Benick, J.; Dimroth, F.; Glunz, S.; Granek, F.; Hermle, M.; Hörteis, M.; Jaus, J.; Kellenbenz, R.; Oliva, E.; Peharz, G.; Peharz, G.; Philipps, S. P.; Siefert, G.

»High Efficiency Solar Cells and Concentrated Photovoltaics – Developments at Fraunhofer ISE«, German-Japanese Solar Day 2010, Fraunhofer Gesellschaft & jdz, Tokyo, Japan, 5.10.2010

Bett, A. W.; Dimroth, F.; Kailuweit, P.; Kellenbenz, R.; Klinger, V.; Oliva, E.; Philipps, S. P.; Roesener, T.; Siefert, G.; Welsch, E.

»Development of High Efficiency Solar Cells at Fraunhofer ISE«, 3rd International Symposium on Innovative Solar Cells 2010, Tokyo Institute of Technology / University of Tokyo / AIST, Tokyo, Japan, 7./8.10.2010

Bett, A. W.; Kurtz, S. (National Renewable Energy Laboratory NREL, Golden, CO, USA)

»CPV Technology Overview«, 1st EPIA International Conference on CPV 2010, EPIA, Munich, Germany, 11.10.2010

Bläsi, B.

»Einsatz Mikrostrukturierter Funktionaler Oberflächen in 3D-Displays«, 3D-Display- und 3D-Projektionstechnik, Photonics BW, Fellbach, Germany, 29.4.2010

Burhenne, S.

»Aktuelle und zukünftige Forschungsthemen am Fraunhofer ISE, Bereich Energie- und Gebäudetechnik«, Workshop im Rahmen des Passerelle-Programms 2010, Hochschule Luzern, Kappel am Albis, Germany, 21.10.2010

Ebert, G.

»Perspektive Elektromobilität«, Elektrochemische Energiespeicher und Elektromobilität 2010, FVEE, Ulm, Germany, 19./20.1.2010

Ebert, G.

»Electro Mobility«, MIT 2010, Boston, MA, USA, 9.2.2010

Ebert, G.

»Energieversorgung von Elektrofahrzeugen auf Basis Erneuerbarer Energien«, CDU-Hearing 2010, CDU, Stuttgart, Germany, 17.7.2010

Ebert, G.

»Future Prospects of Photovoltaics«, DOW Chemical Technologietag 2010, Schkopau, Germany, 6.9.2010

Gerteisen, D.; Alink, R.

»Investigating the Impact of Liquid Water in a PEFC by Electrochemical Impedance Spectroscopy«, 18th World Hydrogen Energy Conference 2010, EnergieAgentur.NRW, Essen, Germany, 16.–21.05.2010

Glunz, S. W.

»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Research Activities at Fraunhofer ISE«, IMEC Leuven 2010, Leuven, Belgium, 4.2.2010

Glunz, S. W.

»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Opportunities for Inkjet (Metallization)«, XJet 2010, Tel Aviv, Israel, 11.2.2010

Glunz, S. W.

»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Challenges and Opportunities«, »Future Team« Meeting, Varian Semiconductor Equipment, Gloucester, MA, USA, 26.3.2010

Glunz, S. W.

»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Research Activities at Fraunhofer ISE«, Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, MA, USA, 29.3.2010

Glunz, S. W.

»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Challenges and Opportunities«, ET Conference »Opportunity: Innovation and Efficiency« 2010, Applied Materials, Venice, Italy, 15.6.2010

Glunz, S. W.

»Silicon Solar Cells: State-of-the-Art and New Trends«, Innovalight, Sunnyvale, CA, USA, 29.6.2010

Glunz, S. W.

»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Challenges and Opportunities«, Applied Materials, Santa Clara, CA, USA, 30.6.–30.7.2010

Gölz, S.

»Smart Metering und der Endkunde«, E-World energy & water 2010, Essen, Germany, 9.–11.2.2010

Gölz, S.

»Nachhaltiger Energiekonsum durch intelligente Zähler-, Kommunikations- und Tarifsysteme«, 5. Forum Energie und Energieeffizienz in Hochschulen 2010, TU Clausthal, Clausthal, Germany, 14.–16.6.2010

Groos, U.; et al.

»Autarkes Mikroenergiesystem für die portable Notfallmedizin«, 1. Öffentliches Statusmeeting für energieautarke Mikrosysteme 2010, Berlin, Germany, 25./26.2.2010

Hahnel, U.

»Die Mobilität der Zukunft – Können Menschen ihr zukünftiges Mobilitätsverhalten vorhersagen?«, Workshop Verkehrspsychologie 2010, DGP Deutsche Gesellschaft für Psychologie, Würzburg, Germany, 16./17.9.2010

Henning, H.-M.

»Tool for Designing and Choosing the Components for Small-Scale Trigeneration Systems – the PolySMART Pre-Design-Tool«, Workshop for Polygeneration 2010, PolySMART-Semi-Annual Meeting, Warsaw, Poland, 19.1.2010

Henning, H.-M.

»Adsorption Closed Cycles and Machines«, Solar Air-Conditioning 2010, ASHRAE Trade Show mit Task 38 Workshop, Orlando, FL, USA, 27.1.2010

Henning, H.-M.

»Solar Air Conditioning and Refrigeration, Task 38 of the IEA Solar Heating and Cooling Programme«, Solar Air-Conditioning 2010, ASHRAE Trade Show mit Task 38 Workshop, Orlando, FL, USA, 27.1.2010

Henning, H.-M.

»Solarenergie für Gebäude und Städte der Zukunft«, Technologie-zirkel Technologietrends 2010, Fraunhofer Academy, Stuttgart, Germany, 11.3.2010

Henning, H.-M.

»Solar Thermal in Germany – Research and Development«, Solar Thermal Workshop Japan – Germany 2010, Ecos Consult GmbH, Munich, Germany, 9.6.2010

Herkel, S.

»Auf dem Weg zum Nullenergiegebäude – Chancen für die Solarenergie«, 3. Tagung Zukunft SolarArchitektur 2010, Architektenkammer Rheinland-Pfalz, Mainz, Germany, 6.5.2010

Herkel, S.

»European Solar Market – Technologies and Trends«, VKR Board Meeting 2010, VKR Holding, Regensburg, Germany, 17.9.2010

Kranzer, D.; Burger, B.

»The 99 % Efficiency Inverter«, PV Inverter Conference 2010, Photon, Stuttgart, Germany, 27.4.2010

Kranzer, D.; Burger, B.

»Photovoltaic Inverters with SiC-Transistors«, Application Workshop 2010, SiC Power Electronics, Stockholm, Sweden, 18./19.5.2010

Kuhn, T.

»Creating Business from Ideas«, Transforming Innovation into Realistic Market Implementation Programmes 2010, IEA International Energy Agency, Paris, France, 27.4.2010

Löper, P.; Hermle, M.; Zacharias, M.; Glunz, S.

»Quantenstrukturen aus Silizium für die Photovoltaik«, Seminar »Micro Energy Harvesting« 2010, Graduiertenkolleg »Micro Energy Harvesting«, Freiburg, Germany, 14.1.2010

VORTRÄGE

Nitsche, M.; Peters, M.; Höhn, O.; Bläsi, B.

»Structure Origination by Complex Interference Lithography Processes«, *Lithography Simulation Workshop 2010, Fraunhofer IISB, Hersbruck, Germany, 25.9.2010*

Nitz, P.; Hornung, T.; Kutscheid, G.; Heimsath, A.

»Assessment of Optical Errors of Concentrator Optics for the Optimisation of Design and Production«, *3rd Concentrating Photovoltaic Optics and Power 2010, Concentrator Optics, Bremerhaven, Germany, 20.–22.10.2010*

Peters, M.; Goldschmidt, J. C.; Rüdiger, M.; Hauser, H.; Janz, S.; Hermle, M.; Bläsi, B.

»Diffractive Gratings in Solar Cells and How to Model them«, *Quantsol 2010, European Society for Quantum Solar Energy Conversion, Brigels, Switzerland, 8.–12.3.2010*

Rau, S.

»High Efficient Solar Hydrogen Production by Means of PEM Electrolysis«, *Helmholtz Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Berlin, Germany, 18. 2.2010*

Reichert, S.

»Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge«, *FVEE-Workshop »Elektrochemische Energiespeicher und Elektromobilität« 2010, Ulm, Germany, 19./20.1.2010*

Reichert, S.

»Netzstützung durch PV-Wechselrichter – Die neuen Einspeiselinien«, *2010, Solarmarkt AG, Freiburg, Germany, 17.3.2010*

Rosenits, P.

»Kleine Einführung in das Gebiet des Geistigen Eigentums – Schwerpunkt: Patente«, *Fraunhofer Mentorenprogramm 2010, Ilmenau, Germany, 16.7.2010*

Saint-Cast, P.; Kania, D.; Hofmann, M.; Benick, J.; Weiss, L.; Kohn, N.; Rentsch, J.

»Is PECVD a Solution to Quickly Bring Aluminum Oxide to Industrial Production?«, *SiliconFOREST 2010, Falkau, Germany, 28.2.–3.3.2010*

Schick Tanz, M.

»Technische Randbedingungen und Betrachtungen BHKW-TAK-Kopplung«, *Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung 2010, Fraunhofer ISE, PSE-AG, Freiburg, Germany, 18.5.2010*

Siefer, G.; Peharz, G.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Characterization of III-V Multi-Junction Concentrator Cells and Systems«, *TechnaGroup, Montecatini, Italy, 13.–18.6.2010*

Smolinka, T.

»Redox-Flow-Batterien«, *Sitzung DKE/BKT Beraterkreis Technologie, Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik, Frankfurt am Main, Germany, 5.11.2010*

Smolinka, T.

»Wasserstoffzeugung durch Elektrolyse«, *EBI-Seminar, DVGW Forschungsstelle am EBI des KIT, Karlsruhe, Germany, 5.11.2010*

Smolinka, T.; Berthold, S. (Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, Germany); Dennenmoser, M.; Dötsch, C. (Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, Germany); Noak, J. (Fraunhofer ICT, Pfinztal, Germany); Tübke, J. (Fraunhofer ICT, Pfinztal, Germany); Vetter, M.

»Redox-Flow Batteries – Electric Storage Systems for Renewable Energies«, *First International Flow Battery Forum, The International Flow Battery Forum, Vienna, Austria, 16./17.6.2010*

Smolinka, T.; Berthold, S.; Dennenmoser, M.; Dötsch, C.; Noak, J.; Tübke, J.; Vetter, M.

»Redox-Flow Batterien – Elektrische Speichersysteme für regenerative Energien«, *FVEE-Workshop »Elektrochemische Energiespeicher und Elektromobilität« 2010, FVEE e. V., Ulm, Germany, 19./20.1.2010*

Vetter, M.

»Batteriemodule, Batteriesysteme und Netzintegration von dezentralen Speichern«, *Neue Meilensteine zur Akkumulatorentwicklung – Festveranstaltung 2010, ISIT Itzehoe, Dispatch Energy, Itzehoe, Germany, 5.11.2010*

Vetter, M.; Bopp, G.; Ortiz, B.; Schwunk, S.

»Bedeutung und Auslegung von Energiespeichern für PV-Hybridsysteme und Inselnetze«, *Elektrochemische Energiespeicher und Elektromobilität 2010, FVEE (Forschungsverbund Erneuerbare Energien), Ulm, Germany, 19./20.1.2010*

Vetter, M.; Schwunk, S.; Armbruster, N.

»Energy Management for Batteries in Electric Vehicles«, Battery Technology Workshop 2010, British Embassy in Copenhagen, London, Great Britain, 15.1.2010

Weber, E. R.

»Die Rolle der Solarenergie in unserer zukünftigen Energieversorgung«, Ringvorlesung Umwelt an der Technischen Universität München, Munich, Germany, 27.1.2010

Weber, E. R.

»Energie nachhaltig gewinnen, intelligent verteilen und effizient nutzen«, Fraunhofer-Forum 2010, Munich, Germany, 15.3.2010

Weber, E. R.

»Solar after Copenhagen – Opportunities and Risks for Germany and the U.S.«, 2. Deutsch-Amerikanische Energietage 2010, Berlin, Germany, 23.3.2010

Weber, E. R.

»Die Zukunft der Photovoltaischen Stromerzeugung«, Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany, 27.4.2010

Weber, E. R.

»Solarenergie als Kernstück unserer künftigen Stromversorgung«, EWE AG, Oldenburg, Germany, 27.5.2010

Weber, E. R.

»Wissenschaftliche Herausforderungen der organischen Photovoltaik«, Freiburger Material- und Forschungszentrum FMF der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, Germany, 11.6.2010

Weber, E. R.

»Solarenergie – die Lösung aller Probleme?«, Physikalisches Kolloquium der Universität Tübingen, Tübingen, Germany, 15.6.2010

Weber, E. R.

»20 Years of Progress in Understanding the Role of Defects in PV Silicon Including Recent Applications to UMG Silicon«, National Renewable Energy Laboratory NREL, Breckenridge, CO, USA, 3.8.2010

Weber, E. R.

»Progress in Crystal Growth and Epitaxy of Solar Cells«, International Conference on Crystal Growth ICCG-16, Beijing, China, 9.8.2010

Weber, E. R.

»The Role of Nanostructured Systems in Photovoltaics«, International Nano-Optoelectronics Workshop iNOW, Changchun, China, 10.8.2010

Weber, E. R.

»Silicon Feedstock for PV – The Next Ten Years«, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2010, Valencia, Spain, 7.9.2010

Weber, E. R.

»Scientific Advances to Lead Photovoltaics to the Terawatt Level«, European Materials Research Society E-MRS, Warsaw, Poland, 15.9.2010

Weber, E. R.

»Erneuerbare Energien als wichtigstes Standbein des deutschen Energiekonzeptes«, Fraunhofer-Energietage 2010, Berlin, Germany, 23.9.2010

Weber, E. R.

»Neueste Entwicklungen im Bereich der solaren Energieversorgung«, DII Annual Conference 2010, Barcelona, Spain, 26.10.2010

Weber, E. R.

»The Future Energy Supply for the World«, Ioffe Physical Technical Institute, St. Petersburg, Russia, 29.10.2010

Weber, E. R.

»Das neue Ziel der Klimapolitik im Jahr der Energie: 100 % regenerativ«, Festvortrag Jahresfeier 2010 der Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany, 19.11.2010

Weber, E. R.

»Solarstrom aus der Steckdose: neue Konzepte für CO₂-freie Systeme«, Urania Berlin, BMBF Energy-Lectures, Berlin, Germany, 24.11.2010

Weber, E. R.

»Solarenergie als Teil einer 100 % regenerativen Energieversorgung«, Berlin-Brandenburgische-Akademie der Wissenschaften BBAW, Berlin, Germany, 26.11.2010

IMPRESSUM

Redaktion

Marion Hopf, Karin Schneider (Leitung)

Presse und Public Relations

Bildquellen

badenova

Michael Eckmann, Freiburg

Thomas Ernsting, Bonn

Fraunhofer ISE

GTZ/Glocke

Guido Kirsch, Freiburg

Kollektorfabrik

Paul Langrock/Zenitlaif

MAGNUM Fuel Cell

Dirk Mahler, Neuruppin

Margrit Müller, Freiburg

Pfizer Manufacturing Deutschland GmbH, Werk Freiburg/

Fototeam Vollmer

Philips Lighting/Nana Kofi Acquah

Joscha Rammelberg, Freiburg

Daniel Schoenen, Freiburg

Claudia Seitz, Sankt Märgen

Vötsch-Industrietechnik

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 oder per Fax.
Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.*

www.ise.fraunhofer.de/presse-und-medien/presseinformationen

*© Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Freiburg, 2011*

VERANSTALTUNGEN 2011
MIT BETEILIGUNG DES
FRAUNHOFER ISE

BAU 2011

München, 17.–22.1.2011

European American Solar Deployment
Conference: PV Rollout
Boston, USA, 10./11.2.2011

26. Symposium Photovoltaische
Solarenergie (OTTI)
Kloster Banz, Bad Staffelstein 2.–4.3.2011

Battery Japan – 2nd International
Rechargeable Battery Expo
Tokio, Japan, 2.–4.3.2011

40. Jahrestagung der Gesellschaft
für Umweltsimulation
Stutensee, 30.3.–1.4.2011

7th International Conference on
Concentrating Photovoltaics (CPV-7)
Las Vegas, USA, 4.–6.4.2011

HANNOVER MESSE
Hannover, 4.–8.4.2011

Workshop PV-Module Reliability
Berlin, 5./6.4.2011

International Sorption Heat Pump
Conference ISHPC11
Padua, Italien, 6.–8.4.2011

SiliconPV, 1st International Conference
on Silicon Photovoltaics
Freiburg, 17.–20.4.2011

21. Symposium Thermische Solarenergie (OTTI)
Kloster Banz, Bad Staffelstein, 11.–13.5.2011

10th IEA Heat Pump Conference
Tokyo, Japan, 16.–19.5.2011

15th AM0 Workshop on Space Solar Cell
Calibration and Measurement Techniques
Freiburg, Fraunhofer ISE, 1.–3.6.2011

Intersolar
München, 8.–10.6.2011

European Fuel Cell Forum
Luzern, Schweiz, 28.6.–1.7.2011

Intersolar North America
San Francisco, USA, 12.–14.7.2011

26th European Photovoltaic Solar Energy
Conference and Exhibition (PVSEC)
Hamburg, 5.–9.9.2011

5th European Weathering Symposium EWS
Lissabon, Portugal, 21.–23.9.2011

f-cell Forum
Stuttgart, 26./27.9.2011

CLEAN TECH WORLD
Berlin, Flughafen Tempelhof, 30.9.–3.10.2011

4th International Conference on
Solar Air-Conditioning
Larnaca, Zypern, 12./13.10.2011

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Aicher, T.; Szolak, R.; Griesser, L. (Griesser Engineering, Zurich, Switzerland)

»Versatile Fuel Processor for Oxidative Steam Reforming and (Catalytic Partial) Oxidation«, 18th World Hydrogen Energy Conference 2010, EnergieAgentur.NRW, Essen, Germany, 16.–21.5.2010

Aksünger, Ü.; Philipp, D.; Köhl, M.; Weiß, K.-A.

»Stabilization of Electrical Parameters of Thin-Film Modules under Controlled Conditions«, in: Proceedings, SPIE Solar Energy and Technology 2010, San Diego, CA, USA, 1.–5.8.2010, CD-ROM

Aksünger, Ü.; Philipp, D.; Köhl, M.; Weiß, K.-A.

»Stabilization of Electrical Parameters of Thin-Film Modules«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM

Alink, R.; Gerteisen, D.

»ESEM Imaging of Water Transport in Porous Material for PEFCs«, Transport in Porous Materials – Microscopy and Modelling 2010, PSI, Villigen, Switzerland, 19./20.8.2010

Alink, R.; Gerteisen, D.; Mérida, W. (University of British Columbia, Vancouver, B. C., Canada)

»Investing the Water Transport in Porous Media for PEMFCs by Liquid Water Visualization in ESEM«, in: Fuel Cells (Special Issue MODVAL Conference 2010)

ABmus, M.; Köhl, M.; Weiß, K.-A.

»Dynamische mechanische Windlasten auf Verglasungen«, in: Proceedings, Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM

Bartsch, J.; Mondon, A.; Godejohann, B.-J.; Hörteis, M.; Glunz, S. W.

»Advanced Front Side Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells Based on a Fully Plated Contact«, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Bartsch, J.; Mondon, A.; Schetter, C.; Hörteis, M.; Glunz, S. W.

»Copper as Conducting Layer in Advanced Front Side Metallization Processes for Crystalline Silicon Solar Cells, Exceeding 20% on Printed Seed Layers«, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Baur, C. (European Space Agency, Noordwijk, Netherlands); Bett, A. W.

»Modeling of the Degradation of III-V Triple-Junction Cell due to Particle Irradiation on the Basis of Component Cells«, in: Proceedings, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Benick, J.; Bateman, N. (Varian Semiconductor Equipment Associates, Gloucester, MA, USA); Hermle, M.

»Very Low Emitter Saturation Current Densities on Ion Implanted Boron Emitters«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Benick, J.; Richter, A.; Li, T.-AT. (School of Engineering, Canberra, Australia); Grant, N. E. (Centre for Sustainable Energy Systems, Canberra, Australia); McIntosh, K. R. (Centre for Sustainable Energy Systems, Canberra, Australia); Ren, Y. (Centre for Sustainable Energy Systems, Canberra, Australia); Weber, K. J. (Centre for Sustainable Energy Systems, Canberra, Australia); Hermle, M.; Glunz, S. W. »Effect of a Post-Deposition Anneal on Al₂O₃/Si Interface Properties«, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Bergmann, A.; Gerteisen, D.; Kurz, T.

»Coupled Multidimensional Modelling of CO Poisoning of a HTPEM Fuel Cell in Dynamic and Steady-State Operation«, 7th ModVal 2010, EPFL, Lausanne, Switzerland, 23./24.3.2010

Bergmann, A.; Kurz, T.; Gerteisen, D.; Hebling, C.

»Spatially Resolved Impedance Spectroscopy in PEM Fuel Cells up to 200°C«, 18th World Hydrogen Energy Conference 2010, EnergieAgentur.NRW, Essen, Germany, 16.–21.5.2010

Bett, A. W.

»Photovoltaik 3.0 – Innovation für mehr Strom aus Licht«, Photonik 2020 – Impulsvortrag für Workshop IV, Berlin, Germany, 23.3.2010

Bett, A. W.; Benick, J.; Dimroth, F.; Glunz, S.; Granek, F.; Hermle, M.; Hörteis, M.; Jaus, J.; Kellenbenz, R.; Oliva, E.; Peharz, G.; Philipps, S. P.; Siefer, G.

»High Efficiency Solar Cells and Concentrated Photovoltaics – Developments at Fraunhofer ISE«, German-Japanese Solar Day 2010, FhG & jdz, Tokyo, Japan, 5.10.2010

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Bett, A. W.; Dimroth, F.; Kailuweit, P.; Kellenbenz, R.; Klinger, V.; Oliva, E.; Philipps, S. P.; Roesener, T.; Siefert, G.; Welsler, E.
»Development of High Efficiency Solar Cells at Fraunhofer ISE«, 3rd International Symposium on Innovative Solar Cells 2010, Tokyo Institute of Technology, University of Tokyo, AIST, Tokyo, Japan, 7./8.10.2010
- Bett, A. W.; Kurtz, S. (National Renewable Energy Laboratory NREL, Golden, CO, USA)
»CPV Technology Overview«, 1st EPIA International Conference on CPV 2010, EPIA, Munich, Germany, 11.10.2010
- Bett, A.
»Development of III-V-Based Solar Cells and Their Applications«, 1st First Turkish Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Solar TR-1, Ankara, Turkey, 29./30.4.2010
- Biryukov, S. (Ben-Gurion University of the Negev, Sede Boqer Campus, Israel); Burger, B.; Melnichak, V. (Ben-Gurion University of the Negev, Sede Boqer Campus, Israel); Rogalla, S.; Yarmolinsky, L. (Albert Katz International School of Desert Studies, Sede Boqer Campus, Israel)
»A New Method of Dust Removal for PV-Panels by Means of Electric Fields«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM
- Bivour, M.; Pysch, D.; Hermle, M.; Glunz, S. W.
»n-Type Silicon Solar Cells with Amorphous / Crystalline Silicon Heterojunction Rear Emitter«, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010
- Bläsi, B.
»Einsatz Mikrostrukturierter Funktionaler Oberflächen in 3D-Displays«, 3D-Display- und 3D-Projektionstechnik, Photonics BW, Fellbach, Germany, 29.4.2010
- Bläsi, B.
»Mikrostrukturierte Kunststoffoberflächen in Solar- und Display-technik«, in: Proceedings, Transparente Kunststoffe 2010, Würzburg, Germany, 9./10.3.2010
- Bogdanski, N. (TÜV Rheinland Group, Cologne, Germany); Herrmann, W. (TÜV Rheinland Group, Cologne, Germany); Reil, F. (TÜV Rheinland Group, Cologne, Germany); Köhl, M.; Weiß, K.-A.; Heck, M.
»Results of three Years PV Module Outdoor Weathering in Various Open Air Climates«, in: Proceedings, SPIE Solar Energy and Technology 2010, San Diego, CA, USA, 1.–5.8.2010, CD-ROM
- Boldt, F. M.; Hampel, J.; Wencel, Y.; Kwapil, W.; Geilker, J.; Fertig, F.; Rein, S.; Reber, S.
»Effect of Segregation during Crystallization of Highly Upgraded Metallurgical Silicon«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010
- Bongs, C.; Dalibard, A. (Stuttgart University of Applied Science, Stuttgart, Germany); Kohlenbach, P. (Solem Consulting, Weinstadt, Germany); Marc, O. (Laboratory of Building Physics and Systems, Saint Pierre, France); Gurruchaga, I. (AIGUASOL Engineering, Barcelona, Spain)
»Simulation Tools for Solar Cooling Systems – Comparison for a Virtual Chilled Water«, in: Proceedings, Eurosun 2010, Graz, Austria, 28.9–1.10.2010, CD-ROM
- Bongs, C.; Henning, H.-M.
»The Impact of Reference State on the Second-Law Analysis of Evaporative Cooling Processes«, in: Proceedings, 23rd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems 2010, Lausanne, Switzerland, 14.-16.6.2010, CD-ROM
- Burger, B.
»Advances in Power Electronics for Terrestrial PV«, in: Proceedings, Solar Array Reg. Based Upon DET/MPPT: When & Why 2010, Noordwijk, The Netherlands, 25./26.3.2010, CD-ROM
- Burger, B.
»Power Electronics for Off Grid Photovoltaics«, in: Proceedings, Seminar Power Electronics for Photovoltaics 2010, Munich, Germany, 7./8.6.2010, CD-ROM

Burger, B.

»Power Electronics for Photovoltaics – Review«, in: *Proceedings, Seminar Power Electronics for Photovoltaics 2010, Munich, Germany, 7.18.6.2010, CD-ROM*

Burger, B.

»Single Phase Inverters for Grid Connection«, in: *Proceedings, Seminar Power Electronics for Photovoltaics 2010, Munich, Germany, 7.18.6.2010, CD-ROM*

Burger, B.

»Three Phase Inverters for Grid Connection«, in: *Proceedings, Seminar Power Electronics for Photovoltaics 2010, Munich, Germany, 7.18.6.2010, CD-ROM*

Burger, B.

»Wechselrichter für Inselssysteme«, in: *Proceedings, Seminar Dezentrale Stromversorgung mit Photovoltaik 2010, Freiburg, Germany, 6.10.2010, CD-ROM*

Burger, B.; Goeldi, B.; Rogalla, S.; Schmidt, H.

»Module Integrated Electronics – an Overview«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*

Burger, B.; Rogalla, S.; Schmidt, H.

»Modulintegrierte Elektronik – eine Übersicht«, in: *Proceedings, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 3.–5.3.2010, CD-ROM*

Burhenne, S.

»Aktuelle und zukünftige Forschungsthemen am Fraunhofer ISE, Bereich Energie- und Gebäudetechnik«, *Workshop im Rahmen des Passerelle-Programms 2010, Hochschule Luzern, Kappel am Albis, Switzerland, 21.10.2010*

Burhenne, S.; Elci, M.; Jacob, D.; Neumann, C.; Herkel, S.

»Sensitivity Analysis with Building Simulations to Support the Commissioning Process«, in: *Proceedings, International Conference for Enhanced Building Operations 2010, Kuwait, Kuwait, 25.–28.10.2010, CD-ROM*

Burhenne, S.; Jacob, D.; Florita, A. (University of Colorado, Boulder, CO, USA); Henze, G. (University of Colorado, Boulder, CO, USA)
»Optimizing Building Energy Simulation Models in the Face of Uncertainty«, in: *Proceedings, SimBuild Conference 2010, New York, NY, USA, 11.–13.8.2010, CD-ROM*

Burhenne, S.; Jacob, D.; Henze, G. (University of Colorado, Boulder, CO, USA)
»Uncertainty Analysis in Building Simulation with Monte Carlo Techniques«, in: *Proceedings, SimBuild Conference 2010, New York, NY, USA, 11.–13.8.2010, CD-ROM*

Burhenne, S.; Ufheil, M. (Solares Bauen GmbH, Freiburg, Germany)
»Nutzer-Seminar – Solarenergie«, in: *Proceedings, Gebäude. Energie. Technik 2010, Freiburg, Germany, 5.–7.3.2010*

Cánovas, E. (ETSIT, Madrid, Spain); Fuertes Marrón, D. (ETSIT, Madrid, Spain); Martí, A. (ETSIT, Madrid, Spain); Luque, A. (ETSIT, Madrid, Spain); Stanley, C. R. (Department of Electronics and Electrical Engineering, Glasgow, Scotland, United Kingdom); Farmer, C. D. (Department of Electronics and Electrical Engineering, Glasgow, Scotland, United Kingdom); Bett, A. W.

»Optoelectronic Characterization of Intermediate Band Solar Cells by Photoreflectance: Comparison to other Advanced Architectures«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Germany, 6.–10.9.2010*

Clement, F.; Thaidigsmann, B.; Hoenig, R.; Fellmeth, T.; Spribille, A.; Lohmüller, E.; Krieg, A.; Glatthaar, M.; Wirth, H.; Biro, D.; Preu, R.; Menkoe, M. (Bosch Solar Energy, Erfurt, Germany); Meyer, K. (Bosch Solar Energy, Erfurt, Germany); Lahmer, D. (Bosch Solar Energy, Erfurt, Germany); Krokoszinski, H.-J. (Bosch Solar Energy, Erfurt, Germany); Neidert, M. (Heraeus Precious Metal, Hanau, Germany); Henning, A. (Heraeus Precious Metal, Hanau, Germany); Mohr, C. (Heraeus Precious Metal, Hanau, Germany); Zhang, W. (Heraeus Precious Metal, Hanau, Germany)

»Pilot-Line Processing of Highly-Efficient MWT Silicon Solar Cells«, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, Germany, 6.–10.9.2010*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Demant, M.; Glatthaar, M.; Haunschild, J.; Rein, S.
»Analysis of Luminescence Images Applying Pattern Recognition Techniques«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Dimroth, F.; Philipps, S. P.; Welser, E.; Kellenbenz, R.; Roesener, T.; Klinger, V.; Oliva, E.; Steiner, M.; Meusel, M. (Azur Space Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Guter, W. (Azur Space Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Bett, A. W.
»Promises of Advanced Multi-Junction Solar Cells for the Use in CPV Systems«, in: *Proceedings, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010, CD-ROM*
- Dirnberger, D.; Heydenreich, W.; Kiefer, K.
»Performance of Thin Film PV Technologies – Fraunhofer ISE Experience Form Field and Laboratory Measurements«, *6th International Thin Film Conference 2010, Würzburg, Germany, 6.–8.2.2010*
- Dirnberger, D.; Bartke, J.; Steinhüser, A.; Kiefer, K.; Neuberger, F.
»Uncertainty of Field I-V-Curve Measurements in Large Scale PV-Systems«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*
- Drießen, M.; Janz, S.; Reber, S.
»Epitaxial Lateral Overgrowth with Silicon over SiO₂ with Rapid Thermal CVD for Light Trapping in Crystalline Silicon Thin Solar Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Dupeyrat, P.; Hofmann, P.; Rommel, M.; Stryi-Hipp, G.
»Entwicklung eines hocheffizienten photovoltaisch-thermischen Hybridkolektors«, in: *Proceedings, 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM*
- Dupeyrat, P.; Menezo, C. (Cethil, Lyon, France); Wirth, H.; Haedrich, I.; Rommel, M. (University of Applied Sciences, Rapperswil, Switzerland); Kwiatkowski, G.; Stryi-Hipp, G.
»Alternative PV-Module Structure with Increased Optical Performances for PV-Thermal Applications«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*
- Dupeyrat, P.; Menezo, C. (Cethil, Lyon, France); Wirth, H.; Hofmann, P.; Kwiatkowski, G. (EDF R&D EnerBAT, , France); Rommel, M. (University of Applied Sciences Rapperswil, Rapperswil, Switzerland); Stryi-Hipp, G.
»Design of a Flate-Plate Photovoltaic-Thermal Hybrid Collector«, in: *Proceedings, Eurosun 2010, Graz, Austria, 28.9.–1.10.2010, CD-ROM*
- Ebert, G.
»Electro Mobility«, in: *Proceedings, 1st International Green Energy Technology Forum 2010, Seoul, Republic of Korea, 15./16.3.2010, CD-ROM*
- Ebert, G.
»Electro Mobility«, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 9.2.2010
- Ebert, G.
»Elektromobilität«, Elektrochemische Energiespeicher und Elektromobilität 2010, FVEE, Ulm, Germany, 19./20.1.2010
- Ebert, G.
»Energieversorgung von Elektrofahrzeugen auf Basis Erneuerbarer Energien«, CDU-Hearing 2010, CDU, Stuttgart, Germany, 17.7.2010
- Ebert, G.
»Future Prospects of Photovoltaics«, DOW Chemical Technologietag 2010, Schkopau, Germany, 6.9.2010
- Ebert, G.
»Perspektive Elektromobilität«, Elektrochemische Energiespeicher und Elektromobilität 2010, FVEE, Ulm, Germany, 19./20.1.2010
- Ebert, G.
»Photovoltaics in Germany – A Brief Overview«, in: *Proceedings, 1st International Green Energy Technology Forum 2010, Seoul, Republic of Korea, 15./16.3.2010, CD-ROM*
- Ebert, G.
»Saubere Energie für saubere Straßen – Elektrofahrzeuge und deren Energieversorgung«, in: *Proceedings, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 3.–5.3.2010, CD-ROM*

Fahr, S.; Schäfer, A.; Mehnert, S.; Kramer, K.; Hess, S.; Thoma, C.; Stryi-Hipp, G.; Luginsland, F.

»Neuer Leistungsteststand zur Charakterisierung innovativer Kollektoren und optischer Komponenten«, in: *Proceedings, 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM*

Fallisch, A.; Keding, R.; Kästner, G.; Bartsch, J.; Werner, S.; Stüwe, D.; Specht, J.; Preu, R.; Biro, D.

»SiNTO EWT Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Fallisch, A.; Stüwe, D.; Neubauer, R.; Wagenmann, D.; Keding, R.; Nekarda, J.; Preu, R.; Biro, D.

»Inkjet Structured EWT Silicon Solar Cells with Evaporated Aluminum Metallization and Laser-Fired Contacts«, *35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*

Fell, A.; Hopman, S.; Granek, F.

»Investigation on the Influence of the Intensity Profile on the Doping Quality in Laser Chemical Processing (LCP)«, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Fell, A.; Hopman, S.; Granek, F.

»Simulation Supported Description of the Local Doping Formation Using Laser Chemical Processing (LCP)«, in: *Applied Physics A: Materials Science & Processing (2010)*, (online available: <http://dx.doi.org/10.1007/s00339-010-6089-y>)

Fellmeth, T.; Fritz, S.; Menkoe, M.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.

»19,5" Efficient Screen Printed Crystalline Silicon Metal Wrap Through (MWT) Solar Cells for Concentrator (2-25x) Applications«, *6th International Conference on Concentrating 2010, Freiburg, Germany, 7.–9.4.2010*

Fellmeth, T.; Meyer, K. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany); Greulich, J.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.; Menkoe, M. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany); Lahmer, D. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany); Krokoszinski, H.-J. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany)

»Development and Modelling of Crystalline Silicon Based Metal Wrap Through (MWT) Solar Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Fischer, S.; Goldschmidt, J. C.; Löper, P.; Krämer, K. W. (University of Bern, Bern, Switzerland); Biner, D. (University of Bern, Bern, Switzerland); Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Calibrated Photoluminescence Measurements of the Upconverter $\text{Na}_2\text{F}_4:20\%\text{Er}_3+$ for Silicon Solar Cells«, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Frohberger, D.; Wiesenfarth, M.; Jaus, J.; Schramek, P. (Solar Tower Systems GmbH, Starnberg, Germany); Bett, A.

»Feasibility Study on High Concentrating Photovoltaic Towers«, *6th International Conference on Concentrating 2010, Freiburg, Germany, 7.–9.4.2010*

Frontini, F.; Kuhn, T.

»A New Angle-Selective, See-Through BIPV Façade for Solar Control«, in: *Proceedings, Eurosun 2010, Graz, Austria, 28.9–1.10.2010, CD-ROM*

Frontini, F.; Kuhn, T.

»Eine neue Methode für die Modellierung des Transmissionsgrads der Solarenergie von komplexen Fassaden mit dem Esp-r Gebäude Simulation Programm und seinen Anwendungen«, in: *Proceedings, 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM*

Fuentes, R. E. (University of South Carolina, Columbia, SC, USA); Rau, S.; Smolinka, T.; Weidner, J. W. (University of South Carolina, Columbia, SC, USA)

»Bimetallic Electrocatalysts Supported on TiO_2 for PEM Water Electrolyzer«, in: *ECS Transaction, Volume 28, August 2010, Electrochemical Technologies for Hydrogen Production 2010, Vancouver, Canada, 25.–30.4.2010*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Gautero, L.; Kania, D.; Knorz, A.; Saint-Cast, P.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Sallese, J. (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland); Preu, R.
»Comparison of Different Rear Contacting Approaches for Industrial PERC Solar Cells on MC-Si Wafer«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Geilker, J.; Kwapil, W.; Reis, I.; Rein, S.
»Doping Concentration and Mobility in Compensated Material: Comparison of Different Determination Methods«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Georg, A.
»Transparente Elektroden aus Silber«, in: *Vakuum in Forschung und Praxis, 22 (2010), No. 5, pp. 24–27*
- Georg, A.
»Transparente Elektroden für organische Solarzellen auf Basis dünner Silberschichten«, in: *Galvanotechnik, 101 (2010), pp. 1132–1136*
- Gerteisen, D.; Alink, R.
»Investigating the Impact of Liquid Water in a PEFC by Electrochemical Impedance Spectroscopy«, *18th World Hydrogen Energy Conference 2010, EnergieAgentur.NRW, Essen, Germany, 16.–21.5.2010*
- Giesecke, J. A.; Walter, D.; Kopp, F.; Rosenits, P.; Schubert, M. C.; Warta, W.
»Simultaneous Determination of Carrier Lifetime and Net Dopant Concentration of Silicon Wafers from Photoluminescence«, *35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*
- Glatthaar, M.; Haunschild, J.; Zeidler, R.; Rentsch, J.; Rein, S.; Breitenstein, O.; Hinken, D.; Bothe, K.
»Luminescence Imaging for Quantitative Solar Cell Material and Process«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Glatthaar, M.; Hohl-Ebinger, J.; Krieg, A.; Greif, M.; Greco, L.; Clement, F.; Rein, S.; Warta, W.
»Accurate IV-Measurement for Back Contact Solar Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Glunz, S. W.
»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Challenges and Opportunities«, *»Future Team: Meeting, Varian Semiconductor Equipment, Gloucester, MA, USA, 26.3.2010*
- Glunz, S. W.
»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Challenges and Opportunities«, *ET Conference »Opportunity: Innovation and Efficiency 2010«, Applied Materials, Venice, Italy, 15.6.2010*
- Glunz, S. W.
»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Changes and Opportunities«, *Applied Materials, Santa Clara, CA, USA, 30.6.–30.7.2010*
- Glunz, S. W.
»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Opportunities for Inkjet (Metallization)«, *XJet 2010, Tel Aviv, Israel, 11.2.2010*
- Glunz, S. W.
»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Research Activities at Fraunhofer ISE«, *IMEC Leuven 2010, Leuven, Belgium, 4.2.2010*
- Glunz, S. W.
»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Research Activities at Fraunhofer ISE«, *Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA, 29.3.2010*
- Glunz, S. W.
»Silicon Solar Cells: State-of-the-Art and New Trends«, *Innovalight, Sunnyvale, CA, USA, 29.6.2010*
- Glunz, S. W.; Benick, J.; Biro, D.; Hermle, M.; Pysch, D.; Rauer, M.; Reichel, C.; Richter, A.; Rüdiger, M.; Schmiga, C.; Suwito, D.; Suwito, D.; Wolf, A.; Preu, R.
»n-Type Silicon – Enabling Efficiencies > 20% in Industrial Production«, *35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*

Goldschmidt, J. C.; Fischer, S.; Bauer, G. H.; Brüggemann, R.; Krämer, K.; Biner, D.; Hermle, M.; Glunz, S. W.
 »Upconversion for Silicon Solar Cells«, 22nd Workshop on Quantum Solar Energy Conversion 2010, European Society for Quantum Solar Energy Conversion, Brigels, Switzerland, 7.–10.3.2010

Goldschmidt, J. C.; Fischer, S.; Löper, P.; Krämer, K. W. (University of Bern, Bern, Switzerland); Biner, D. (University of Bern, Bern, Switzerland); Hermle, M.; Glunz, S. W.
 »Upconversion to Enhance Silicon Solar Cell Efficiency – Detailed Experimental Analysis with both Coherent Monochromatic Irradiation and White Light Illumination«, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Goldschmidt, J. C.; Peters, M.; Gutmann, J.; Bläsi, B.; Hermle, M.; Steidl, L. (Institut für Organische Chemie, Johannes Guttenberg Universität, Mainz, Germany); Zentel, R. (Institut für Organische Chemie, Johannes Guttenberg Universität, Mainz, Germany)
 »Increasing Fluorescent Concentrator Light Collection Efficiency by Restricting the Angular Emission«, SPIE Photonics Europe 2010, Brussels, Belgium, 12.–16.4.2010

Gölz, S.
 »Nachhaltiger Energiekonsum durch intelligente Zähler-, Kommunikations- und Tarifsysteme«, 5. Forum Energie und Energieeffizienz in Hochschulen 2010, TU Clausthal, Clausthal, Germany, 14.–16.6.2010

Gölz, S.
 »Smart Metering und der Endkunde«, E-World Energy & Water 2010, Essen, Germany, 9.–11.2.2010

Gradmann, R.; Löper, P.; Künle, M.; Rothfelder, M.; Janz, S.; Hermle, M.; Glunz, S.
 »Silicon Nanocrystals in SiC: The Influence of Doping on Crystallisation and Electrical Properties«, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Granek, F.; Fleischmann, C.; Klusk, S.; Erath, D.; Rentsch, J.
 »Screen-Printed Silicon Solar Cells with LCP Selective Emitters«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM

Groos, U.
 »Micro Fuel Cells«, in: Microsystems Technology in Germany

Groos, U.; et al.
 »Autarkes Mikroenergiesystem für die portable Notfallmedizin«, 1. Öffentliches Statusmeeting für energierautarke Mikrosysteme 2010, Berlin, Germany, 25./26.2.2010

Groos, U.; Smolinka, T.
 »Wasserstoff und Brennstoffzellen – Die Marktchancen wachsen«, in: Energy 2.0 – Kompendium 2010

Gundel, P.; Schubert, M. C.; Heinz, F. D.; Warta, W.
 »Recombination Activity Enhancement by Stress in Silicon«, in: Proceedings, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Guter, W. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Bensch, W. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Kern, R. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Köster, W. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Meusel, M. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Strobl, G. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Gerstmeier, T. (Concentrix Solar GmbH, Freiburg, Germany); Gombert, A. (Concentrix Solar GmbH, Freiburg, Germany); Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Development, Cost Reduction and Customized Design of Industrial Concentrator Solar Cells with Efficiencies Approaching 40% and Above«, in: Proceedings, 35th PVSEC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Habenicht, H.; Schubert, M. C.; Coletti, G. (Energy Research Centre of the Netherlands, Petten, The Netherlands); Warta, W.
 »Photoluminescence Imaging of Chromium in Crystalline Silicon«, in: Proceedings, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Hahnel, U.
 »Die Mobilität der Zukunft – Können Menschen ihr zukünftiges Mobilitätsverhalten vorhersagen?«, Workshop Verkehrspsychologie 2010, DGP Deutsche Gesellschaft für Psychologie, Würzburg, Germany, 16./17.9.2010

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Hampel, J.; Boldt, F. M.; Wiehl, N. (Johannes Gutenberg Universität, Mainz, Germany); Hampel, G. (Johannes Gutenberg Universität, Mainz, Germany); Kratz, J. V. (Johannes Gutenberg Universität, Mainz, Germany); Reber, S.

»Use of HCl Gas Gettering in the Epitaxial Wafer Equivalent Concept«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Haunschild, J.; Glatthaar, M.; Riepe, S.; Rein, S.

»Quality Control Using Luminescence Imaging in Production of mc-Solar Cells from UMG Feedstock«, in: *Proceedings, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*

Hauser, H.; Berger, P.; Müller, C.; Hermle, M.; Bläsi, B.

»Nanoimprint Lithography for Solar Cell Texturisation«, in: *Proceedings, SPIE Photonics Europe 2010, Brussels, Belgium, 12.–16.4.2010*

Hauser, H.; Michl, B.; Schwarzkopf, S.; Müller, C. (Imtek, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Hermle, M.; Bläsi, B.

»Development of Nanoimprint Lithography for Solar Cell Texturisation«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Heck, M.; Köhl, M.; Philipp, D.; Weiß, K.-A.

»Outdoor Exposure of PV-Modules under Extreme Climatic Conditions«, in: *Broschüre des Virtuellen Instituts UFS, 2010*

Heinz, F. D.; Gundel, P.; Schubert, M. C.; Warta, W.

»Mapping the Quantitative Carrier Lifetime and Doping Concentration with Micro Resolution«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Helmers, H.; Oliva, E.; Bronner, W. (Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF, Freiburg, Germany); Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Advanced Processing Techniques Used for the Development of Dual-Junction Monolithic Interconnected Modules«, in: *Proceedings, 6th International Conference on Concentrating Photovoltaics 2010, Freiburg, Germany, 7.–9.4.2010, CD-ROM*

Henning, H.-M.

»Adsorption Closed Cycles and Machines«, *Solar Air-Conditioning 2010, ASHRAE Trade Show mit Task 38 Workshop, Orlando, FL, USA, 27.1.2010*

Henning, H.-M.

»Integrating Heat Pumps and Solar Thermal Energy«, in: *Proceedings, 1st Conference of the ETP on Renewable Heating and Cooling 2010, Bilbao, Spain, 23./24.2.2010, CD-ROM*

Henning, H.-M.

»Kraft-Wärme-Kältekopplung für effiziente thermische Kühlung«, in: *Proceedings, 2. International Symposium Solares und Erneuerbares Kühlen, Stuttgart, Germany, 26.2.2010*

Henning, H.-M.

»Solar Assisted Cooling«, in: *Proceedings, 1st Conference of the ETP on Renewable Heating and Cooling 2010, Bilbao, Spain, 23./24.2.2010, CD-ROM*

Henning, H.-M.

»Solar Building Façades – Concepts for Building Renovation and New Buildings«, in: *Proceedings, Enviotech 2010, Vienna, Austria, 4./5.2.2010, CD-ROM*

Henning, H.-M.

»Solar Cooling: Technologies, Systems, Trends«, *OTTI-Seminar Solar Air-Conditioning 2010, Munich, Germany, 8.6.2010*

Henning, H.-M.

»Solar Thermal in Germany – Research and Development«, *Solar Thermal Workshop Japan – Germany 2010, Ecos Consult GmbH, Munich, Germany, 9.6.2010*

Henning, H.-M.

»Solarenergie für Gebäude und Städte der Zukunft«, *Technologie-zirkel Technologietrends 2010, Technologietrends Fraunhofer Academy, Stuttgart, Germany, 11.3.2010*

Henning, H.-M.

»Tool for Designing and Choosing the Components for Small-Scale Trigeneration Systems – the PolySMART Pre-Design-Tool«, *Workshop for Polygeneration 2010, PolySMART-Semi-Annual Meeting, Warsaw, Poland, 19.1.2010*

Henning, H.-M.; Herkel, S.

»Advances in Housing Renovation«, Final Task 37 Seminar 2010, San Francisco, CA, USA, 21.6.2010

Henning, H.-M.; Herkel, S.

»Solar Air-Conditioning and Refrigeration – Achievements and Challenges«, in: Proceedings, International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings, Graz, Austria, 28.9.–2.10.2010

Henninger, S.; Munz, G.; Müller, S.; Ratzsch, K.-F.; Schossig, P.; Henning, H.-M.

»Hydrothermal Treatment of Sorption Materials – Implications on Adsorption Heat Pumps«, in: Proceedings, 1st International Conference on Materials for Energy 2010, Karlsruhe, Germany, 4.–8.7.2010, CD-ROM

Herke, S.

»Auf dem Weg zum Nullenergiegebäude – Chancen für die Solarenergie«, 3. Tagung Zukunft SolarArchitektur 2010, Architektenkammer Rheinland-Pfalz, Mainz, Germany, 6.5.2010

Herke, S.

»European Solar Market – Technologies and Trends«, VKR Board Meeting 2010, VKR Holding, Regensburg, Germany, 17.9.2010

Herke, S.; Burhenne, S.

»Intelligentes Energiemanagement«, in: Proceedings, Energy Masters 2010, Berlin, Germany, 18.3.2010, CD-ROM

Hermann, M.; Lunz, K.; Keyl, H.-M.; Koch, L.; Stryi-Hipp, G.

»Fluid Flow Investigations of Bionic Absorbers Made from Aluminium and Steel«, in: Proceedings, Eurosun 2010, Graz, Austria, 28.9.–1.10.2010, CD-ROM

Herrmann, W. (TÜV Rheinland Group, Cologne, Germany);

Bogdanski, N. (TÜV Rheinland Group, Cologne, Germany); Reil, F. (TÜV Rheinland Group, Cologne, Germany); Köhl, M.; Weiss, K.-A.; Heck, M.

»PV Module Degradation Caused by Thermo-Mechanical Stress: Real Impacts of Outdoor Weathering versus Accelerated Testing in the Laboratory«, in: Proceedings, SPIE Solar Energy and Technology 2010, San Diego, CA, USA, 1.–5.8.2010, CD-ROM

Hess, S.; Oliva, A.; di Lauro, P.; Klemke, M.; Hermann, M.;

Stryi-Hipp, G.; Kallwellis, V. (Wagner & Co. Solartechnik GmbH, Cölbe, Germany); Kramp, G. (Wagner & Co. Solartechnik GmbH, Cölbe, Germany); Eisenmann, W. (Wagner & Co. Solartechnik GmbH, Cölbe, Germany); Hanby, V. (Institute of Energy and Sustainable Development, Leicester, Great Britain)

»Flachkollektor mit externen Reflektoren (RefleC): Entwicklungsverfahren«, in: Proceedings, 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM

Hofmann, P.; Dupeyrat, P.; Kramer, K.; Hermann, M.; Stryi-Hipp, G.

»Measurements and Benchmark of PV-T Collectors according to EN12975 and Development of a Standardized Measurement Procedure«, in: Proceedings, Eurosun 2010, Graz, Germany, 28.9.–1.10.2010, CD-ROM

Hohl-Ebinger, J.; Warta, W.

»Bifacial Solar Cells in STC Measurement«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM

Hönig, R.; Clement, F.; Menkoe, M.; Retzlaff, M.; Biro, D.; Preu, R.;

Neidert, M. (W.C. Heraeus, Hanau, Germany); Henning, A. (W.C. Heraeus, Hanau, Germany); Mohr, C. (W.C. Heraeus, Hanau, Germany); Zhang, W. (W.C. Heraeus, Hanau, Germany)

»Paste Development for Screen Printed MC-Si MWT Solar Cells Exceeding 17% Efficiency«, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Hopman, S.; Fell, A.; Mesec, M.; Kluska, S.; Fleischmann, C.;

Granek, F.; Glunz, S. W.

»Influence of Concentration of Phosphorous Dopant Liquid and Pulse Distance on Parameters of LCP Selective Emitters for Silicon Solar Cells«, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Hornung, T.; Bachmaier, A.; Nitz, P.; Gombert, A.

»Temperature and Wavelength Dependent Measurement and Simulation of Fresnel Lenses for Concentrating Photovoltaic«, SPIE Photonics Europe 2010, Brussels, Belgium, 12.–16.4.2010

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Hornung, T.; Bachmaier, A.; Nitz, P.; Gombert, A.
»Temperature Dependent Measurement and Simulation of Fresnel Lenses for Concentrating Photovoltaics«, in: *Proceedings, 6th International Conference on Concentrating Photovoltaics 2010, Freiburg, Germany, 7.–9.4.2010*
- Hörteis, M.; Benick, J.; Nekarda, J.; Richter, A.; Preu, R.; Glunz, S. W.
»Fundamental Studies on the Front Contact Formation Resulting in a 21% Efficiency Silicon Solar Cell with Printed Rear and Front Contacts«, *35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*
- Hörteis, M.; Benick, J.; Nekarda, J.; Richter, A.; Preu, R.; Glunz, S. W.
»Fundamental Reactions During the Formation of Fired Silver Contacts and Solar Cell Results«, *2nd Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells 2010, Constance, Germany, 14./15.4.2010*
- Hübner, G.; Zeller, J.; Hermann, M.
»Untersuchung von Heat-Pipes aus solarthermischen Kollektoren«, in: *Proceedings, 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM*
- Hülsmann, P.; Jäger, M.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.
»Measuring and Simulation of Water Vapour Permeation into PV-Modules under Different Climatic Conditions«, in: *Proceedings, SPIE Solar Energy and Technology 2010, San Diego, CA, USA, 1.–5.8.2010, CD-ROM*
- Jacob, D.; Burhenne, S.
»Optimization Techniques for Building Simulations with Uncertain Parameters«, in: *Proceedings, 8th International Conference on System Simulation in Buildings 2010, Liege, Belgium, 13.–15.12.2010, CD-ROM*
- Jäger, U.; Knorz, A.; Mingirulli, N.; Nekarda, J.; Preu, R.
»Zukunftsmarkt Photovoltaik – Wege zur Grid Parity«, in: *Handout Mappe, Laser in der Photovoltaik 2010, Nürnberg, Germany, 17.3.2010*
- Jäger, U.; Mack, S.; Kimmerle, A.; Wolf, A.; Preu, R.
»Influence of Doping Profile of Highly Doped Regions for Selective Emitter Solar Cells«, *35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*
- Jäger, U.; Oesterlin, P.; Kimmerle, A.; Preu, R.
»Beam Shaping – The Key to High Throughput Selective Emitter Laser Processing with a Single Laser System«, *35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*
- Jäger, U.; Suwito, D.; Benick, J.; Janz, S.; Hermle, M.; Glunz, S.; Preu, R.
»A Simple Laser Based Process for the Formation of a LBSF for n-Type Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Janz, S.; Peters, M.; Künle, M.; Gradmann, R.; Suwito, D.
»Amorphous SiC Layers for Electrically Conductive Rugate Filters in Silicon Based Solar Cells«, *SPIE Photonics Europe 2010, Brussels, Belgium, 12.–16.4.2010*
- Jung, M.; Schwunk, S.
»Ladezustandsbestimmung bei Lithium-Ionen-Batterien – Wie gut sind derzeit am Markt verfügbare Halbleiterbausteine wirklich?«, *17. DESIGN & ELEKTRONIK-Entwicklerforum 2010, Munich, Germany, 24.2.2010*
- Jungwirth, S. (Humboldt-Universität, Berlin, Germany); Röder, B. (Humboldt-Universität, Berlin, Germany); Schlothauer, J. (Humboldt-Universität, Berlin, Germany); Köhl, M.; Weiß, K.-A.
»Fluoreszenz als Degradationsindikator für Polymere«, in: *Proceedings, 39. GUS Jahrestagung 2010, Stutensee, Germany, 17.–19.3.2010, CD-ROM*
- Kalz, D.
»Nichtwohngeläude nutzen zunehmend Umweltenergie und thermoaktive Bauteile«, in: *Moderne Gebäudetechnik, 3 (2010)*
- Kalz, D.; Pafferott, J.
»Comparative Evaluation of Natural Ventilated and Mechanical Cooled Non-Residential Buildings«, in: *Proceedings, 6th Adapting to Change: New Thinking on Comfort 2010, London, Great Britain, 9.–11.4.2010, CD-ROM*
- Kalz, D.; Pafferott, J.; Herkel, S.
»Cooling Concepts for Low-Energy Buildings Using Environmental Energy: Thermal Comfort«, in: *Proceedings, CLIMA 2010, Antalya, Turkey, 9.–12.5.2010, CD-ROM*

- Kania, D.; Saint-Cast, P.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.
 »High Temperature Stability of PECVD Aluminium Oxide Layers Applied as Negatively Charged Passivation on C-Si Surfaces«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Kästner, G.; Zimmer, M.; Birmann, K.; Souren, F.; Rentsch, J.; Preu, R.
 »Single Side Polish Etching for the Rear Side of Crystalline Silicon Wafers«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Kellenbenz, R.; Hoheisel, R.; Kailuweit, P.; Guter, W. (Azur Space Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Dimroth, F.; Bett, A. W.
 »Development of Radiation Hard Ga_{0.50}In_{0.50}P/Ga_{0.99}In_{0.01}As/Ge Space Solar Cells with Quantum Wells«, in: *Proceedings, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*
- Keller, M.; Lindekugel, S.; Reber, S.
 »Plasma Texturing of Thin Film Solar Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Khandelwal, R. (Institut für Halbleitertechnik RWTH, Aachen, Germany); Hofmann, M.; Trogus, D.; Gautero, L.; Seiffe, J.; Rentsch, J.
 »Plasma Single-Sided Etching for Rear Emitter Etch-Back and Flattening of Industrial Crystalline Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Kiefer, K.; Dirnberger, D.; Müller, B.; Heydenreich, W.; Kröger-Vodde, A.
 »A Degradation Analysis of PV Power Plants«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*
- Kluska, S.; Rodofili, A. (RENA GmbH, Gütenbach, Germany); Mayer, K.; Fleischmann, C.; Granek, F.; Glunz, S. W.
 »Analysis of Local Boron Dopings Formed with LCP«, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Knorz, A.; Gutscher, S.; Gundel, P.; Fell, A.; Preu, R.
 »High Speed Laser Drilling: Parameter Evaluation and Characterisation«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Köhl, M.; Heck, M.; Weiss, K.-A.; Wiesmeier, S.
 »Qualification of Collectors and Components by Exposure to Extreme Climatic Conditions«, in: *Proceedings, Eurosun 2010, Graz, Austria, 28.9.–1.10.2010, CD-ROM*
- Köhl, M.; Peike, C.; Weiss, K.-A.
 »Qualification of New Polymeric Materials for Solar Thermal Applications«, in: *Proceedings, Eurosun 2010, Graz, Austria, 28.9.–1.10.2010, CD-ROM*
- Kranzer, D.
 »Power Semiconductors«, in: *Proceedings, Seminar Power Electronics for Photovoltaics 2010, Munich, Germany, 7.18.6.2010, CD-ROM*
- Kranzer, D.; Burger, B.
 »The 99% Efficiency Inverter«, *PV Inverter Conference 2010, Photon, Stuttgart, Germany, 27.4.2010*
- Kranzer, D.; Burger, B.
 »Photovoltaic Inverters with SiC-Transistors«, *Application Workshop 2010, SiC Power Electronics, Stockholm, Sweden, 18./19.5.2010*
- Kranzer, D.; Wilhelm, C.; Burger, B.
 »Hocheffiziente und kompakte PV-Wechselrichter mit SiC-Transistoren«, in: *Proceedings, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 3.–5.3.2010*
- Krause, J.; Woehl, R.; Biro, D.
 »Analysis of Local Al-p+-Layers for Solar Cells Processed by Small Screen-Printed Structures«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Krieg, A.; Schmitt, C.; Rein, S.; Nübling, S. (Sick AG, Reute, Germany)
 »Wafer Identification Using Laser Marked Data Matrix Codes«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Kröger-Vodde, A.; Armbruster, A.; Hadek, V.; Heydenreich, W.; Kiefer, K.

»Distributed vs. Central Inverters – a Comparison of Monitored PV Systems«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*

Kuhn, T.

»Creating Business from Ideas«, *Transforming Innovation into Realistic Market Implementation Programmes 2010, IEA International Energy Agency, Paris, France, 27.4.2010*

Kuhn, T.; Herkel, S.; Henning, H.-M.

»Active Solar Façades (PV and Solar Thermal)«, in: *Proceedings, 3rd International Conference on Passive and Low Energy Cooling for the Built Environment PALENC 2010, Rhodes Islands, Greece, 29.9.–1.10.2010, CD-ROM*

Kuhn, T.; Herkel, S.; Henning, H.-M.

»Multifunctional Energy Harvesting Components for the Building Skin of the Future«, in: *Proceedings, 2. Symposium Aktiv Solarhaus 2010, Luzern, Switzerland, 22./23.9.2010, CD-ROM*

Künle, M.; Janz, S.; Löper, P.; Rothfelder, M.; Gradmann, R.; Reber, S.; Eibl, O. (Institute for Applied Physics, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen, Germany); Nickel, K.-G. (Institute for Geosciences, Eberhard-Karls-Universität, Tübingen, Germany)

»Crystallization of Si and SiC in SiC Thin Films for Photovoltaic Applications«, *DGKK-Tagung 2010, Freiburg, Germany, 4.3.2010*

Künle, M.; Löper, P.; Rothfelder, M.; Janz, S.; Nickel, K.-G. (Eberhard Karls Universität, Tübingen, Germany); Eibl, O. (Eberhard-Karls-Universität, Tübingen, Germany)

»Structural and Optical Characterization of Si Quantumdots in a SiC Matrix«, in: *Proceedings, MRS Spring Meeting, San Francisco, CA, USA, 4.–9.4.2010, CD-ROM*

Kurz, T.; Keller, J.

»A Compact Open-Cathode HTPEM Fuel Cell Module for Portable Applications«, *18th World Hydrogen Energy Conference 2010, Essen, Germany, 16.–21.5.2010*

Kurz, T.; Keller, J.

»Heat Management in a HTPEM Fuel Cell Module with Open Cathode«, in: *Wiley Fuel Cells, 7. MODVAL 2010, Lausanne, Switzerland, 23./24.3.2010*

Kwapil, W.; Wagner, M. (SolarWorld Innovations GmbH, Freiberg, Germany); Schubert, M. C.; Warta, W.

»Cause of Increased Currents under Reverse-Bias Conditions of Upgraded Metallurgical Grade Multicrystalline Silicon Solar Cells«, *35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*

Laukamp, H.; Kremer, P.; Soria Moya, A.; Wittwer, C.; Bopp, G.

»Gibt es relevante Rückströme in PV-Generatoren?«, *25. Symposium, Photovoltaische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 3.–5.3.2010*

Link, J.; Kohrs, R.; Dallinger, D. (Fraunhofer ISI, Karlsruhe, Germany)

»Optimierte Betriebsführungskonzepte von Plug-In Fahrzeugen und dezentraler Erzeuger im Smart Home«, in: *Proceedings, Smart Cities 2010, Leipzig, Germany, 8./9.11.2010*

Löper, P.; Hermle, M.; Zacharias, M.; Glunz, S.

»Quantenstrukturen aus Silizium für die Photovoltaik«, *Seminar »micro energy harvesting« 2010, Graduiertenkolleg »micro energy harvesting«, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany, 14.1.2010*

Löper, P.; Hiller, D. (IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Künle, M.; Gradmann, R.; Rothfelder, M.; Janz, S.; Hermle, M.; Zacharias, M. (IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Glunz, S. W.

»Carrier Confinement and Transport in High Bandgap Materials with Embedded Si Quantum Dots«, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Löper, P.; Künle, M.; Hiller, D.; Gradmann, R.; Janz, S.; Hermle, M.; Zacharias, M.; Glunz, S. W.

»Silicon Quantum Dot Superstructures for All-Silicon Tandem Solar Cells: Electrical and Optical Characterization«, *Quantsol 2010, European Society for Quantum Solar Energy Conversion, Brigels, Switzerland, 7.–13.3.2010*

Mack, S.; Biro, D.; Wolf, A.; Walczak, A.; Spiegelman, J. J. (Rasirc Inc., San Diego, CA, USA); Preu, R.

»Purified Steam for Industrial Thermal Oxidation Processes«, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Mack, S.; Jäger, U.; Kästner, G.; Wotke, E. A.; Belledin, U.; Wolf, A.; Preu, R.; Biro, D.

»Towards 19% Efficient Industrial PERC Devices Using Simultaneous Front Emitter and Rear Surface Passivation by Thermal Oxidation«, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Mayer, K.; Orellana Pérez, T.; Rostas, M.; Schumann, M.; Granek, F.; Glunz, S.; Rosenfeld, E. (Innovalight Inc., Sunnyvale, CA, USA); Kray, D. (Innovalight Inc., Sunnyvale, CA, USA); Antoniadis, H. (Innovalight Inc., Sunnyvale, CA, USA)

»Aromatic Compounds as Substitutes for 2-Propanol as Texturing Additive in Aqueous Alkaline Solutions«, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Meinhardt, C.; Pysch, D.; Bivour, M.; Zimmermann, K.; Schetter, C.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Optimization and Analysis of Deposition Processes of Amorphous Silicon for Silicon Heterojunction Solar Cells«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM

Menkö, M.; Reitenbach, H.; Hoenig, R.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.

»Fast and Precise Resistent Characterization of Laser Drilled and Metalized Vias«, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Meusel, M. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Bensch, W. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Fuhrmann, D. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Guter, W. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Kern, R. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Köstler, W. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Löckenhoff, R. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Strobl, G. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Kellenbenz, R.; Klinger, V.; Siefer, G.; Welsler, E.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»III-V Multijunction Solar Cells – From Current Space and Terrestrial Products to Modern Cell Architectures«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Meyer, K. (Bosch Solar Energy GmbH, Erfurt, Germany); Krokoszinski, H.-J. (Bosch Solar Energy GmbH, Erfurt, Germany); Lahmer, D. (Bosch Solar Energy GmbH, Erfurt, Germany); Wuetherich, T. (Bosch Solar Energy GmbH, Erfurt, Germany); Dupke, M. (Bosch Solar Energy GmbH, Erfurt, Germany); Jesswein, R. (Bosch Solar Energy GmbH, Erfurt, Germany); Lossen, J. (Bosch Solar Energy GmbH, Erfurt, Germany); Zerrer, P. (Bosch Solar Modules GmbH, Erfurt, Germany); Prießner, A. (Bosch Solar Modules GmbH, Erfurt, Germany); Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.

»Novel MWT Cell Design in Monocrystalline Silicon Wafers«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Miara, M.; Russ, C.

»Feldtestergebnisse für Sole- und Luft-Wärmepumpen«, 1. VDI-Fachkonferenz Wärmepumpen - Umweltwärme effizient nutzen 2010, Stuttgart, Germany, 8./9.6.2010

Mondon, A.; Bartsch, J.; Schetter, C.; Hörteis, M.; Glunz, S. W.

»Advanced Front Side Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells Based on a Nickel-Silicon Contact«, 2nd Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells 2010, Constance, Germany, 14.4.–15.5.2010

Morgenstern, A.

»Solar Air-Conditioning – Trends and Future Developments«, in: Proceedings, Solarthermie-Konferenz 2010, Wels, Austria, 4.3.2010, CD-ROM

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Nekarda, J.

»Zukunftsperspektiven für Laseranwendungen in der kristallinen Photovoltaikindustrie«, in: *Laser Community*, 1 (2010), pp. 30

Nekarda, J.; Reinwand, D.; Hartmann, P.; Preu, R.

»Industrial Inline PVD Metallization for Silicon Solar Cells with Laser Fired Contacts«, 2nd Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells 2010, Constance, Germany, 14./15.4.2010

Nekarda, J.-F.; Lottspeich, F.; Hörteis, M.; Wolf, A.; Preu, R.

»Comparison of Three Different Metallization Concepts for LFC Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Nekarda, J.-F.; Lottspeich, F.; Wolf, A.; Preu, R.

»Silicon Solar Cells Using Aluminum Foil as Rear Side Metallization Reaching 21.0 % Efficiency«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Nienborg, B.

»Solarthermie versorgt Gebäude mit Wärme und Kälte«, in: *Erneuerbare Energien*, (2010)

Nievendick, J.; Zimmer, M.; Souren, F.; Haunschild, J.; Demant, M.; Krieg, A.

»Appearance of Surface Defects Created by Acidic Texturization and their Impact on Solar Cell Efficiency«, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010

Nitsche, M.; Peters, M.; Höhn, O.; Bläsi, B.

»Structure Origination by Complex Interference Lithography Processes«, *Lithography Simulation Workshop 2010, Fraunhofer IISB, Hersbruck, Germany, 25.9.2010*

Nitz, P.

»Optics for Concentrating and Non Concentrating Photovoltaics«, in: *Proceedings, Optikkolloquium 2010, Aachen, Germany, 18.–20.10.2010*

Nitz, P.; Hornung, T.; Kutscheid, G.; Heimsath, A.

»Assessment of Optical Errors of Concentrator Optics for the Optimisation of Design and Production«, 3rd Concentrating Photovoltaic Optics and Power 2010, Concentrator Optics, Bremerhaven, Germany, 20.–22.10.2010

Noeren, D.

»Electric Vehicles Fueled by Renewable Energy Sources – Variable Pricing Levels«, *World Future Energy Summit 2010, Abu Dhabi, United Arab Emirates, 20.1.2010*

Nunez, T.

»Solare Kühlung im kleinen Leistungsbereich: zwei Anlagen im EU-Projekt ›Solera‹«, in: *Proceedings, 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM*

Nunez, T.

»Thermally Driven Cooling: Technologies, Developments and Applications«, in: *Journal of Sustainable Energy, 16th Conference of Energy Engineering 2010, Oradea, Rumania, 27.–29.5.2010*

Nunez, T.; Wendker, K. (Solvis GmbH & Co KG, Braunschweig, Germany); Mittelbach, W. (SorTech AG, Halle, Germany)

»Entwicklung und Feldtest von Komplettpaketen zur solaren Kühlung: das Projekt ›SolCoolSys‹«, in: *Proceedings, 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM*

Oesterlin, P. (INNOVAVENT GmbH, Göttingen, Germany); Jäger, U.

»High Throughput Laser Doping for Selective Emitter Crystalline Si Solar Cells«, 18th IEEE RTP 2010, Gainesville, FL, USA, 28.9.–1.10.2010

Oesterlin, P. (INNOVAVENT GmbH, Göttingen, Germany); Jäger, J.; Zühlke, H.-U. (Jenoptik Automatisierungstechnik GmbH, Jena, Germany); Büchel, A. (Jenoptik Automatisierungstechnik GmbH, Jena, Germany)

»Industrialization of the Laser Diffusion Process: Innovative Concepts for Increased Production Throughput«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Oltersdorf, A.; Moldovan, A.; Bayer, M.; Zimmer, M.; Rentsch, J.

»Surface Contamination of Silicon Wafer after Acid Texturisation«, in: *Proceedings, UCPS 2010, Leuven, Belgium, 19.–22.9.2010*

Orellana Pérez, T.; Funke, C.; Fütterer, W.; Wagner, T.; Riepe, S.; Reber, S.; Möller, H. J.

»Mechanical Characterization of Epitaxial Wafer Equivalents from Block Casting to Thin Film Deposition«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Papapetrou, M. (WIP Renewable Energies, Munich, Germany); Wieghaus, M.; Biercamp, C.

»Roadmap for the Development of Desalination Powered by Renewable Energy«, in: *Fraunhofer Verlag, (2010)*

Peharz, G.; Bugliaro, L. (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen, Germany); Siefer, G.; Bett, A. W.

»Evaluations of Sattelite Circus Data for Performance Models of CPV Modules«, *6th International Conference on Concentrating Photovoltaics 2010, Freiburg, Germany, 7.–9.4.2010*

Peharz, G.; Ferrer-Rodriguez, J. P.; Siefer, G.

»Temperature Coefficients of FLATCON Modules«, *6th International Conference on Concentrating Photovoltaics 2010, Freiburg, Germany, 7.–9.4.2010*

Peike, C.; Kaltenbach, T.; Köhl, M.; Weiß, K.-A.

»Lateral Distribution of the Degradation of Encapsulants after Different Damp-Heat Exposure Times Investigated by Raman Spectroscopy«, in: *Proceedings, SPIE Solar Energy and Technology 2010, San Diego, CA, USA, 1.–5.8.2010, CD-ROM*

Peters, M.; Goldschmidt, J. C.; Voisin, P.; Hauser, H.; Hermle, M.; Bläsi, B.

»Diffractive Gratings in Solar Cells and How to Model Them«, *Quantsol 2010, Brigels, Switzerland, 7.–13.3.2010*

Peters, M.; Rüdiger, M.; Hermle, M.; Bläsi, B.

»Photonic Crystals in Solar Cells – A Simulation Approach«, *SPIE Photonics Europe 2010, Brussels, Belgium, 12.–16.4.2010*

Peters, M.; Rüdiger, M.; Pelzer, D.; Hauser, H.; Hermle, M.

»Electro-Optical Modelling of Solar Cells with Photonic Structures«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Philipp, D.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.; Heck, M.

»Freibewitterung von PV-Modulen in extremen Klimaten«, in: *Broschüre des virtuellen Instituts UFS, (2010)*

Preu, R.

»Einsatz von Lasertechnik bei kristallinen Solarzellen und Modulen«, *Laserprozesse Photovoltaik 2010, Jena, Germany, 18.11.2010*

Preu, R.; Wolf, A.; Hofmann, M.; Clement, F.; Nekarda, J.; Rentsch, J.; Biro, D.

»Challenges and Advances in Back-Side Metallization«, in: *Photovoltaics International, 7 (2010)*

Pysch, D.; Meinhardt, C.; Bivour, M.; Zimmermann, K.; Schetter, C.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Development and Understanding of the Intrinsic and Doped Amorphous Emitter-Layer Stacks for Silicon Heterojunction Solar Cells«, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Pysch, D.; Meinhardt, C.; Ritzau, K.-U.; Bivour, M.; Zimmermann, K.; Schetter, C.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Comparison of Intrinsic Amorphous Silicon Buffer Layers for Silicon Heterojunction«, in: *Proceedings, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*

Rau, S.

»High Efficient Solar Hydrogen Production by Means of PEM Electrolysis«, *Helmholtz Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Berlin, Germany, 18.2.2010*

Rauer, M.; Schmiga, C.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Simplifying the Manufacturing of n-Type Silicon Solar Cells with Screen-Printed Aluminium-Alloyed Rear Emitter«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Reichel, C.; Reusch, M.; Granek, F.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Decoupling Charge Carrier Collection and Metallization Geometry of Back-Contacted Back-Junction Silicon Solar Cells by Using Insulating Thin Films«, in: *Proceedings, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Reichert, S.

»Grid Integration of PV and Grid Codes«, *Power Electronics for Photovoltaics 2010, München, Germany, 8.6.2010*

Reichert, S.; Siedle, C.; Burger, B.

»Improvement of Power Quality by PV Inverters«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*

Reichert, S.

»Highly Efficient and Compact Bidirectional Charger for E-Mobility«, in: *Proceedings, VDE Kongress 2010, Leipzig, Germany, 8./9.11.2010, CD-ROM*

Reichert, S.

»Leistungselektronik für Elektrofahrzeuge«, *FVEE-Workshop »Elektrochemische Energiespeicher und Elektromobilität« 2010, Ulm, Germany, 19./20.1.2010*

Reichert, S.

»Netzstützung durch PV-Wechselrichter – Die neuen Einspeiserichtlinien«, *Solarmarkt AG, Freiburg, Germany, 17.3.2010*

Reichert, S.; Siedle, C.

»Verbesserung der Spannungsqualität durch PV-Wechselrichter Wechselrichterdimensionierung bei dezentraler Spannungsoberschwingungskompensation«, in: *Proceedings, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 3.–5.3.2010*

Rein, S.; Geilker, J.; Kwapil, W.; Emanuel, G.; Reis, I.; Soiland, A.-K. (Elkem Solar AS, Kristiansand, Norway); Grandum, S. (Elkem Solar AS, Kristiansand, Norway); Tronstad, R. (Elkem Solar AS, Kristiansand, Norway)

»Cz Silicon Wafers and Solar Cells from Compensated Solar-Grade Silicon-Feedstock: Potential and Challenges«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Rein, S.; Wirth, H.; Ferrara, C.

»PV Technologies and Needs for Standardization«, *European Regional Standards Committee Meeting 2010, Freiburg, Germany, 29.1.2010*

Reinwand, D.; Graf, M.; Hartmann, P.; Preu, R.; Trassl, R. (Applied Materials GmbH & Co. KG, Alzenau, Germany)

»Investigation of the Minority Carrier Lifetime Reduction During Industrial DC-Sputtering of Metal Seed Layers«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Reinwand, D.; Specht, J.; Stüwe, D.; Seitz, S.; Nekarda, J.-F.; Biro, D.; Preu, R.; Trassl, R. (Applied Materials GmbH & Co. KG, Alzenau, Germany)

»21.1% Efficient PERC Silicon Solar Cells on Large Scale by Using Inline Sputtering for Metallization«, *35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*

Rentsch, J.; Sperlich, H.-P.; Kohn, N.; Kania, D.; Saint-Cast, P.; Schetter, C.; Hofmann, M.; Preu, R.

»Industrial Deposition of PECVD AlO_x for Rear Passivation of PERC Type Mc-Si Solar Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Richter, A.; Henneck, S. (Infineon Technologies AG, Regensburg, Germany); Benick, J.; Hörteis, M.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Firing Stable Al₂O₃/SiN_x Layer Stack Passivation for the Front Side Boron Emitter of n-Type Silicon Solar Cells«, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Richter, A.; Hörteis, M.; Benick, J.; Henneck, S.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Towards Industrially Feasible High-Efficiency n-Type Si Solar Cells with Boron-Diffused Front Side Emitter – Combining Firing Stable Al₂O₃ Passivation and Fine-Line Printing«, in: *Proceedings, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*

Riffel, D. (Federal University of Sergipe, Aracaju, Brazil);

Wittstadt, U.; Schmidt, F.; Nunez, T.; Belo, F. (Federal University of Paraíba, Joao Passao, Brazil); Leite, A. (Federal University of Paraíba, Joao Passao, Brazil); Ziegler, F. (Technische Universität, Berlin, Germany)

»Transient Modeling of an Adsorber Using Finned-Tube Heat Exchanger«, in: *International Journal of Heat and Mass Transfer, 53 (2010), pp. 1473-1482*

Rinio, M.; Tao, L. (Institute for Solar Energy, Guangzhou, China); Keipert-Colberg, S.; Borchert, D.
 »Double Sided Inline Diffusion of Multicrystalline Silicon Wafers«, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.9.–10.9.2010

Ristic, A. (National Institute of Chemistry, Ljubljana, Slovenia); Henninger, S.; Kaucic, V. (National Institute of Chemistry, Ljubljana, Slovenia)
 »Novel Adsorption Material for Thermal Energy Storage«, in: Proceedings, International Conference on Solar Heating, Cooling and Buildings 2010, Graz, Austria, 28.9.–1.10.2010, CD-ROM

Roesener, T.; Döscher, H. (Helmholtz Zentrum Berlin, Berlin, Germany); Beyer, A. (Philipps Universität, Marburg, Germany); Brückner, S. (Helmholtz Zentrum Berlin, Berlin, Germany); Klinger, V.; Wekkeli, A.; Kleinschmidt, P. (Helmholtz Zentrum Berlin, Berlin, Germany); Jurecka, C. (Philipps Universität, Marburg, Germany); Ohlmann, J. (Philipps universität, Marburg, Germany); Volz, K. (Philipps Universität, Marburg, Germany); Stolz, W. (Philipps Universität, Marburg, Germany); Hannappel, T. (Helmholtz Zentrum Berlin, Berlin, Germany); Bett, A. W.; Dimroth, F.
 »MOVPE Growth of III-V Solar Cells on Silicon in 300MM Closed Coupled Showerhead Reactor«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM

Rogalla, S.; Burger, B.; Goeldi, B.; Schmidt, H.
 »Light and Shadow – When is MPP-Tracking at the Module Level Worthwhile?«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM

Rogalla, S.; Burger, B.
 »Module Integrated Electronics«, in: Proceedings, Seminar Power Electronics for Renewable Energies 2010, Munich, Germany, 7.18.6.2010, CD-ROM

Rogalla, S.; Burger, B.; Reichert, S.; Schönberger, S.
 »Enhancing PV-Inverters for the New Medium Voltage Grid Codes – Lessons Learned from Testing Central PV-Inverters > 100 KW«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM

Rogalla, S.; Burger, B.; Schmidt, H.
 »Licht und Schatten – Wann lohnt sich MPP-Tracking auf Modulebene?«, in: Proceedings, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 3.–5.3.2010

Rosenits, P.
 »Kleine Einführung in das Gebiet des Geistigen Eigentums – Schwerpunkt: Patente«, Fraunhofer Mentorenprogramm 2010, Ilmenau, Germany, 16.7.2010

Rüdiger, M.; Schmiga, C.; Rauer, M.; Hermle, M.; Glunz, S. W.
 »Optimization of Industrial n-Type Silicon Solar Cells with Aluminum-Alloyed Rear Emitter by Means of 2D Numerical Simulation«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Ruschenburg, J.; Herkel, S.; Henning, H.-M.
 »Simulations on Solar-Assisted Heat Pump Heating Systems«, in: Proceedings, BauSIM 2010, Vienna, Austria, 22.–24.9.2010, CD-ROM

Saint-Cast, P.; Benick, J.; Kania, D.; Billot, E.; Richter, A.; Hermle, M.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.; Glunz, S. W.
 »High Efficiency p-Type PERC Solar Cells Applying PECVD AlO_x Layers«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Saint-Cast, P.; Kania, D.; Billot, E.; Weiss, L.; Hofmann, M.; Gautero, L.; Kohn, N.; Biro, D.; Rentsch, J.; Preu, R.
 »p-Type Cz-Si PERC Solar Cells Applying PECVD Aluminum Oxide Rear Surface Passivation«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Saint-Cast, P.; Kania, D.; Hofmann, M.; Benick, J.; Weiss, L.; Kohn, N.; Rentsch, J.
 »Is PECVD a Solution to Quickly Bring Aluminum Oxide to Industrial Production?«, SiliconFOREST 2010, Falkau, Germany, 28.2.–3.3.2010

Sauer, C.; Link, J.; Wittwer, C.
 »Wirtschaftlichkeitsprognosen für PV-Anlagen unter Berücksichtigung der Eigenbedarfsregelung für gewerbliche Verbraucher«, in: Proceedings, 11. Forum Solarpraxis 2010, Berlin, Germany, 11./12.11.2010, CD-ROM

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Sauer, C.; Link, J.; Erge, T.; Gemsjäger, B.

»Netzspeisung, Verkauf oder Eigenverbrauch – Deckungsbeitragsoptimierte Betrachtung dezentraler Akteure (PV, KWK, Plug-In-Fahrzeuge) im Energiesystem«, in: *Proceedings, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 3.–5.3.2010*

Schick Tanz, M.

»Technische Randbedingungen und Betrachtungen BHKW-TAK-Kopplung«, *Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung 2010, Fraunhofer ISE, PSE AG, Freiburg, Germany, 18.5.2010*

Schick Tanz, M.; Wapler, J. (PSE AG, Freiburg, Germany); Henning, H.-M.

»Primärenergieeinsparung, CO₂-Emissionen und Wirtschaftlichkeit der Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung«, *DKV Tagung 2010, Magdeburg, Germany, 17.–19.11.2010*

Schillinger, K.; Lindekugel, S.; Mbobda, S. A.; Janz, S.

»Crystalline SiC Deposited by APCVD as a Multifunctional Intermediate Layer for the Recrystallized Wafer Equivalent«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Schindler, F.; Geilker, J.; Kwapil, W.; Giesecke, J.; Schubert, M.; Warta, W.

»Conductivity Mobility and Hall Mobility in Compensated Multicrystalline Silicon«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*

Schmidt, H.

»Benötigen Dünnschichtmodule spezielle Wechselrichter?«, in: *Proceedings, Grundlagenseminar Thin-Film Photovoltaics 2010, Würzburg, Germany, 8./9.2.2010, pp. 67-76*

Schmidt, H.

»Electromagnetic Compatibility EMC«, in: *Proceedings, Power Electronics for Renewable Energies 2010, Munich, Germany, 7./8.6.2010, CD-ROM*

Schmidt, H.

»Interaction Between Modules and Inverters«, in: *Proceedings, Power Electronics for Renewable Energies 2010, Munich, Germany, 7./8.6.2010, CD-ROM*

Schmiga, C.; Rauer, M.; Rüdiger, M.; Meyer, K. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany); Lossen, J. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany); Krokoszinski, H.-J. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany); Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Aluminium-Doped p⁺ Silicon for Rear Emitters and Back Surface Fields: Results and Potentials of Industrial n- and p-Type Solar Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Schnabel, L.; Tatlier, M. (Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey); Schmidt, F.; Erdem-Senatarlar, A. (Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey)

»Adsorption Kinetics of Zeolite Coatings Directly Crystallized on Metal Supports for Heat Pump Applications«, in: *Applied Thermal Engineering, 30 (11-12), (2010), pp. 1409-1416*

Schön, J.; Habenicht, H.; Schubert, M. C.; Warta, W.

»2D Modeling of the Iron Concentration from Crystallization to Final Firing of MC Silicon Solar Cells«, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Schossig, P.; Haussmann, T.

»Wärme- und Kältespeicherung – Stand der Technik und Perspektiven«, in: *Proceedings, Einsteigerseminar Solarthermie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 4.5.2010, CD-ROM*

Schubert, M. C.; Rüdiger, M.; Michl, B.; Schindler, F.; Kwapil, W.; Giesecke, J.; Hermle, M.; Warta, W.; Ferre, R. (Institut für Solarenergieforschung Hameln, Hameln/Emmenthal, Germany); Wade, R. (Q-Cells SE, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Petter, K. (Q-Cells SE, Bitterfeld-Wolfen, Germany)

»The Role of Material Quality in EWT and Standard Solar Cells on Multicrystalline Standard and UMG Silicon Material«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*

Schumann, M.; Mück, P.; Haas, F.; Riepe, S.

»An Experimental Access to the Coating Influence on Multicrystalline Silicon Materials«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Schwab, C.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Front Surface Passivation for Industrial-Type Solar Cells by Silicon Oxynitride – Silicon Nitride Stacks«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Schwunk, S.; Jung, M.; Knödler, B.; Vetter, M.

»Lithiumbatterien in PV-Anlagen – Ist die Ladezustandsbestimmung für Laptops ausreichend oder besteht Optimierungsbedarf?«, in: *Proceedings, 25. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 3.–5.3.2010*

Seifert, H.; Hohl-Ebinger, J.; Urich, C. (Heliatek GmbH, Dresden, Germany); Timmreck, R. (Institut für Angewandte Photophysik, Dresden, Germany); Riede, M. (Institut für Angewandte Photophysik, Dresden, Germany); Warta, W.

»Spectrometric Characterization of Multi-Junction Organic Solar Cells«, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Seiffe, J.; Khandelwal, R. (RWTH, Aachen, Germany); Clement, C.; Jäger, U.; Hofmann, M.; Rentsch, J.

»Improved Emitters by Dry Etching«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Siefer, G.; Baur, C. (European Space Agency, Noordwijk, Netherlands); Bett, A. W.

»External Quantum Efficiency Measurements of Germanium Bottoms Subcells: Measurement Artifacts and Correction Procedures«, in: *Proceedings, 35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*

Siefer, G.; Peharz, G.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Characterization of III-V Multi-Junction Concentrator Cells and Systems«, *TecnaGroup, Montecatini, Italy, 13.–18.6.2010*

Skjelland, I. (Aventa AS, Oslo, Norway); Weiß, K.-A.; Rekstad, J. (Aventa AS, Oslo, Norway); Meir, M. (Aventa AS, Oslo, Norway)

»Architecturally Appealing Solar Thermal Systems – a Great Marketing Tool in order to Attract New Customers and Market Segments«, in: *Proceedings, Eurosun 2010, Graz, Austria, 28.9.–1.10.2010, CD-ROM*

Smolinka, T.

»Redox-Flow-Batterien«, *Sitzung DKE/BKT Beraterkreis Technologie, Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik, Frankfurt am Main, Germany, 5.11.2010*

Smolinka, T.

»Wasserstoffherzeugung durch Elektrolyse«, *EBI-Seminar, DVGW Forschungsstelle am EBI des KIT, Karlsruhe, Germany, 5.11.2010*

Smolinka, T.; Berthold, S. (Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, Germany); Dennenmoser, M.; Dötsch, C. (Fraunhofer UMSICHT, Oberhausen, Germany); Noak, J. (Fraunhofer ICT, Pfinztal, Germany); Tübke, J. (Fraunhofer ICT, Pfinztal, Germany); Vetter, M.

»Redox-Flow Batteries – Electric Storage Systems for Renewable Energies«, *First International Flow Battery Forum, The International Flow Battery Forum, Vienna, Austria, 16./17.6.2010*

Smolinka, T.; Berthold, S.; Dennenmoser, M.; Dötsch, C.; Noak, J.; Tübke, J.; Vetter, M.

»Redox-Flow Batterien – Elektrische Speichersysteme für regenerative Energien«, *FVEE-Workshop »Elektrochemische Energiespeicher und Elektromobilität« 2010, FVEE e. V., Ulm, Germany, 19./20.1.2010*

Souren, F. (Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands); van de Sanden, M. (Eindhoven University of Technology, Eindhoven, Netherlands); Seiffe, J.; Rentsch, J.

»Surface Texturing for Crystalline Silicon Wafers with Wafer Thickness Down to 100µm«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Specht, J.; Zengerle, K.; Pospischil, M.; Erath, D.; Haunschild, J.; Clement, F.; Biro, D.

»High Aspect Ratio Front Contacts by Single Step Dispensing of Metal Pastes«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Spribille, A.; Clement, F.; Erath, D.; Specht, J.; Biro, D.; Preu, R.; Koehler, I. (MERCK KGaA, Darmstadt, Germany); Doll, O. (MERCK KGaA, Darmstadt, Germany); Stockum, W. (MERCK KGaA, Darmstadt, Germany); Tueshaus, C. (MERCK KGaA, Darmstadt, Germany) »Dispensing of Etching Paste and Inkjetting of Diffusion Barriers for MWT Solar Cell Processing«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Stalter, O.; Burger, B. »Sensorless and Power-Optimized Sun Tracking for CPV Application Using Dual-Axis Trackers«, in: *Proceedings, 6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems 2010, Freiburg, Germany, 7.–9.4.2010, CD-ROM*
- Stalter, O.; Burger, B. »The Mechanical Maximum Power Point Tracker (MPPTm)«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*
- Stalter, O.; Burger, B.; Kranzer, D.; Rogalla, S. »Advanced Solar Power Electronics«, in: *Proceedings, 22nd International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs – ISPSD 2010, Hiroshima, Japan, 6.–10.6.2010, CD-ROM*
- Steinhauser, B.; Suwito, D.; Janz, S.; Hermle, M. »Stacks of a-SiC_x Layers on Planar and Textured Surfaces for the Solar Cell Front Side on both n⁺- and p⁺-Emitters«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*
- Sterner, M. (Fraunhofer IWES, Kassel, Germany); Specht, M. (Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung, Stuttgart, Germany); Ebert, G. »Technologie für eine Energieversorgung von Transport und Verkehr«, in: *Proceedings, Jahrestagung 2010 des Forschungsverbunds Erneuerbare Energien 2010, Berlin, Germany, 11./12.10.2010, CD-ROM*
- Stillahn, T.; Wittwer, C. »Das Netz steht im Zentrum«, in: *ABB connect, (2010)*
- Suwito, D.; Jäger, U.; Benick, J.; Janz, S.; Hermle, M.; Preu, R.; Glunz, S. W. »Industrially Feasible Rear Side Concept for n-Type Silicon Solar Cells Approaching 700 mV of Voc«, *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*
- Thoma, C.; Colonna, P.; Mager, M.; Richter, J. »Zwischenergebnisse aus einem Feldtest mit hocheffizienten Vakuumröhren-Solarluftkollektoren zur solaren Heizungsunterstützung«, in: *Proceedings, 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM*
- Thoma, C.; Martinez Cerezo, J. D.; Kramer, K.; Richter, J.; Mehnert, S.; Stryi-Hipp, G. »Temperature Measurement in Air Ducts – an Optimized Method for Solar Air Heaters«, in: *Proceedings, Eurosun 2010, Graz, Austria, 28.9.–1.10.2010, CD-ROM*
- Tian, X.; Jungmann, T.; Sandris, G.; Hebling, C. »Applying Methanol Vapor in Passive Planar DMFC as Micro Power Sources«, *18th World Hydrogen Energy Conference 2010, Essen, Germany, 17.–19.5.2010*
- Vetter, M. »Batteriemodule, Batteriesysteme und Netzintegration von dezentralen Speichern«, *Neue Meilensteine zur Akkumulatorentwicklung – Festveranstaltung 2010, ISIT Itzehoe + Dispatch Energy, Itzehoe, Germany, 5.11.2010*
- Vetter, M. »Battery Systems Technology – From Cells to Systems«, *Solar Summits 2010, Freiburg, Germany, 13.10.2010*
- Vetter, M. »Netzintegration von dezentralen Speichern«, *BBA Workshop Batterietechnologie 2010, Karlsruhe, Germany, 28.10.2010*
- Vetter, M.; Bopp, G.; Ortiz, B.; Schwunk, S. »Bedeutung und Auslegung von Energiespeichern für PV-Hybrid-systeme und Inselnetze«, *Elektrochemische Energiespeicher und Elektromobilität 2010, FVEE, Ulm, Germany, 19./20.1.2010*

Vetter, M.; Gerald, N. (Fraunhofer ISIT, Itzehoe, Germany)

»Batterieentwicklung vom Material bis zum System – Tandemvortrag«, Kongress Elektromobilität 2010, Berlin, Germany, 16.11.2010

Vetter, M.; Schies, A.; Wachtel, J.; Prasad Koirala, B.; Heile, I.

(Concentrix Solar GmbH, Freiburg, Germany); Gombert, A.

(Concentrix Solar GmbH, Freiburg, Germany); Abulfotuh, F.

(Institute of Graduate Studies, Alexandria, Egypt)

»The World's First CPV Stand-Alone System – Water Supply in Remote Areas of Egypt«, 25th World Conference of Photovoltaic Energy Conversion 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Vetter, M.; Schwunk, S.; Armbruster, N.

»Energy Management for Batteries in Electric Vehicles«, Battery Technology Workshop 2010, British Embassy, Copenhagen, Denmark, 15.1.2010

Vetter, M.; Dennenmoser, M.; Schwunk, S.; Smolinka, T.; Dötsch, C.; Berthold, S.; Tübke, J.; Noack, J.

»Redox Flow Batteries – Already an Alternative Storage Solution for Hybrid PV-Mini-Grids?«, in: Proceedings, PV Hybrid and Mini-Grid Conference 2010, Taragona, Spain, 29./30.4.2010, CD-ROM

Vetter, M.; Schwunk, S.; Armbruster, N.; Spies, P.; Lehmann, T.

»Modelling for Determination of State of Charge, State of Health and Thermal Behaviour of Lithium-Ion Batteries«, Kraftwerk Batterie 2010, Mainz, Germany, 1./2.2.2010

Walter, D.; Rosenits, P.; Kopp, F.; Reber, S.; Berger, B.; Warta, W.

»Determining the Minority Carrier Lifetime in Crystalline Silicon Thin-Film Material«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM

Weiß, K.-A.; Kaltenbach, T.; Peike, C.; Köhl, M.

»Systematische Untersuchung des Alterungsverhaltens von Polymeren in Abhängigkeit von verschiedenen Belastungsfaktoren«, in: Proceedings, 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM

Weiß, K.-A.; Kaltenbach, T.; Peike, C.; Köhl, M.

»Untersuchung der Witterungsbeständigkeit von Polymermaterialien mit Nanofüllern«, in: Proceedings, 2. DSTTP Solarthermie-Technologiekonferenz 2010, Berlin, Germany, 26./27.1.2010, CD-ROM

Werner, S.; Belledin, U.; Kimmerle, A.; Fallisch, A.; Wolf, A.; Biro, D.

»Doping and Carrier Concentration Profile Characterisation of Highly Phosphorus-Doped Emitters«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010

Wiemken, E.; Petry-Elias, A.; Wewior, J.; Koch, L.; Nienborg, B.

»Performance and Perspectives of Solar Cooling«, in: Proceedings, Eurosun 2010, Graz, Austria, 28.9.–1.10.2010, CD-ROM

Wiemken, E.; Wewior, J. W. (PSE AG, Freiburg, Germany);

Petry Elias, A. R.

»Betriebserfahrungen aus solar unterstützter Kaltwassererzeugung zur Gebäudeklimatisierung«, in: Proceedings, 20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM

Wiesenfarth, M.; Thaller, S.; Jaus, J.; Eltermann, F.; Passig, M.;

Bett, A. W.

»Investigations on Interconnection Technologies for CPV Systems«, in: Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM

Wilhelm, C.; Kranzer, D.; Burger, B.

»Development of a Highly Compact and High Efficient Solar Inverter with Silicon Carbide Transistors«, in: Proceedings, International Conference on Integrated Power Electronics Systems – CIPS 2010, Nuremberg, Germany, 16.–18.3.2010, CD-ROM

Wille-Hausmann, B.; Link, J.; Wittwer, C.

»Simulation Study of a ›Smart Grid‹ Approach: Model Reduction, Reactive Power Control«, in: Proceedings, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies 2010, Gothenburg, Sweden, 11.–13.10.2010, CD-ROM

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Wille-Haussmann, B.; Wittwer, C.; Sauer, C.

»Dezentrales Energie- und Netzmanagement mit flexiblen Stromtarifen DEMAX«, in: *Proceedings, 42. Kraftwerkstechnisches Kolloquium 2010, Dresden, Germany, 12./13.10.2010*

Wilson, H. R.; Bretschneider, J. (*International Commission on Glass*);

Hofmann, T. (*International Commission on Glass*); Hutchins, M.

(*International Commission on Glass*); Jonsson, J. (*International*

Commission on Glass); Kermel, C. (*International Commission on*

Glass); Marenne, I. (*International Commission on Glass*); Roos, A.

(*International Commission on Glass*); van Nijnatten, P. (*International*

Commission on Glass); Kuhn, T. (*International Commission on Glass*)

»Transmissionsgrad von Strukturglas für solare Anwendungen –

Ergebnisse eines Ringversuchs des ICG-TC 10«, in: *Proceedings,*

20. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein,

Germany, 5.–7.5.2010, CD-ROM

Wirth, H.

»Tabbing-Stringing Quality Control Challenges«, in: *Photovoltaics International, PV-Modules, 9 (2010)*

Wirth, H.; Tranzitz, M.; Malchow, C.; Clement, F.

»New Technologies for Back Contact Module Assembly«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Wirth, J.; Kratochwill, S.; Wiesmeier, S.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.

»Development of Performance and Module Temperature of Thin-Film Modules«, in: *Proceedings, 6th User Forum Thin-Film Photovoltaics – Int. Conference 2010, Würzburg, Germany, 8./9.2.2010, CD-ROM*

Wittwer, C.

»Netzintegration Erneuerbarer Energien«, in: *Proceedings, 1. Smart Technologies Forum 2010, Munich, Germany, 23./24.6.2010, CD-ROM*

Woehl, R.; Mack, S.; Kohn, N.; Preu, R.; Biro, D.

»Firing Stable Passivation Layers for the Front and Rear Side of High Efficiency n-Type Back-Contact Back-Junction Solar Cells«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010*

Woehl, R.; Rüdiger, M.; Erath, D.; Stüwe, D.; Preu, R.; Biro, D.

»Structuring Technology and Simulation of High Efficiency Back-Contact Back-Junction Silicon Solar Cells under Low Concentration«, *6th International Conference on Concentrating Photovoltaics 2010, Freiburg, Germany, 7.–9.4.2010*

Wolf, A.; Wotke, E. A.; Mack, S.; Nekarda, J.; Biro, D.; Preu, R.;

Schlegel, K. (*SolarWorld Innovations GmbH, Freiberg, Germany*);

Weber, T. (*SolarWorld Innovations GmbH, Freiberg, Germany*);

Lossen, J. (*Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany*); Böschke, T.

(*Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany*); Grohe, A. (*Bosch Solar*

Energy AG, Erfurt, Germany); Engelhart, P. (*Q-Cells SE, Bitterfeld-*

Wolfen, Germany); Müller, J. W. (*Q-Cells SE, Bitterfeld-Wolfen,*

Germany); Schubert, G. (*Sunways AG, Constance, Germany*);

Plagwitz, H. (*Sunways AG, Constance, Germany*); Gassenbauer, Y.

(*SCHOTT Solar AG, Alzenau, Germany*)

»Pilot Processing of > 18% Efficient Rear Surface Passivated Silicon Solar Cells with Screen Printed Front Contacts«, in: *Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010, CD-ROM*

Wolf, A.; Wotke, E. A.; Walczak, A.; Mack, S.; Bitnar, B.; Koch, C.

(*SolarWorld Innovations GmbH, Freiberg, Germany*); Preu, R.;

Biro, D.

»Pilot Line Processing of 18.6% Efficient Rear Surface Passivated Large Area Solar Cells«, *35th IEEE PVSC 2010, Honolulu, Hawaii, USA, 20.–25.6.2010*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Zambelli, E. (Politecnico di Milano, Milano, Italy); Frontini, F.;
Masera, G. (Politecnico di Milano, Milano, Italy); Salvalai, G.
(Politecnico di Milano, Milano, Italy)

»Sustainable Smart-ECO Buildings: An Integrated Energy and
Architecture Design (IEAD) Process to Optimize the Design of the
New Buildings for the Technical University in Lecco, Italy«, in:
Proceedings, CLIMA 2010: Sustainable Energy Use in Buildings 2010,
Antalya, Turkey, 9.–12.5.2010, CD-ROM

Ziegler, J.; Xia, L.; Zejnelovic, R.; Borchert, D.

»Changes in Contact Resistance of Different Metals to Magnetron
Sputtered ITO while Annealing«, in: Proceedings, 25th European
Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2010, Valencia,
Spain, 6.–10.9.2010

Zimmer, M.; Dannenberg, T.; Birman, K.; Rentsch, J.

»Towards the Automation of the Acidic Texturization Process«, in:
Proceedings, 25th European Photovoltaic Solar Energy Conference
and Exhibition 2010, Valencia, Spain, 6.–10.9.2010