



Fraunhofer

ISE

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE



JAHRESBERICHT

2011

Titelfoto:

Passivierte Metal Wrap Through (MWT) Solarzelle, die die Vorteile einer Rückseitenkontaktsolarzelle mit denen der Oberflächenpassivierung in einem Solarzellentyp vereint. Zur Minimierung der Vorderseitenabschattung sind die bei Standardsolarzellen üblichen breiten stromsammelnden Kontaktbereiche von der Vorder- auf die Rückseite verlegt. Die elektrische Verbindung des Vorderseitenkontaktgitters zu den rückseitigen Kontakten erfolgt durch Kontaktdurchführungen (sogenannte Vias). Auf der Vorderseite verbleiben hierdurch nur noch dünne stromsammelnde Leiterbahnen, die die einzelnen Kontaktfinger elektrisch mit den Kontaktdurchführungen verbinden. Mit dieser Zelltechnologie konnte im Jahr 2011 der höchste bisher für großflächige p-Typ Solarzellen gemessene Wirkungsgrad von 20,6 % erreicht werden. Die Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.

VORWORT



2011 feierte das Fraunhofer ISE sein 30jähriges Bestehen. Ein Jubiläum, das uns alle stolz macht und Anlass gab, mit geladenen Gästen, unseren Partnern und Förderern aus Industrie, Wirtschaft und Politik und natürlich unseren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zu feiern. Umso mehr als das Jahr 2011 unter dem Eindruck der Atomkatastrophe von Japan und dem hierauf folgenden Beschluss zum Atomausstieg in Deutschland stand.

»In Situationen wie sie Tschernobyl und jetzt Fukushima mit sich brachten, erinnern sich Politik und Öffentlichkeit immer wieder der Kraft der Sonne«, äußerte sich Prof. Dr. Adolf Goetzberger, unser Institutsgründer, in einem Interview anlässlich unseres 30sten Geburtstags. Besser lassen sich die ersten Wochen und Monate 2011 im Rückblick kaum beschreiben: Wenn dieser Jahresbericht erscheint, wird sich der Reaktorunfall von Fukushima bereits zum ersten Mal gejäht haben. 2011 war ein Jahr, das nach dem weltweiten Schock das Potenzial der erneuerbaren Energien und die Notwendigkeit einer Energiewende unverrückbar im öffentlichen Bewusstsein verankert hat. Insbesondere in Deutschland haben der Markt für erneuerbare Energien und die Transformation der Energiewirtschaft seit dem Moratorium und dem anschließend verkündeten Atomausstieg schlagartig an Tempo und Dynamik gewonnen. Wir stehen heute vor einer der größten Veränderungen und Herausforderungen im Bereich der erneuerbaren Energien, die von Politik, Wirtschaft, Forschung und Gesellschaft gemeinsam getragen werden muss und die – davon bin ich überzeugt – in diesem Zusammenspiel gelingen wird.

Der Beschluss zum Atomausstieg erforderte Mut, den Mut eine Veränderung herbeizuführen, die gleichzeitig eine einmalige Chance für Deutschland ist, sich weltweit als Vorreiter und Impulsgeber für die Energiewende zu etablieren. So müssen u. a. der Netzaus- und -umbau sowie Speicherlösungen und die Errichtung von dezentralen und regionalen Energiesystemen zügig vorangetrieben werden. Als größtes Solarforschungsinstitut Europas werden wir am Fraunhofer ISE all unsere Energie, Motivation und Überzeugung einsetzen, um in



Deutschland und weit darüber hinaus die Energiewende weg von fossilen und atomaren hin zu erneuerbaren Energiequellen möglich zu machen. Auch in Zusammenarbeit mit anderen Fraunhofer-Instituten, z. B. im Rahmen der Fraunhofer-Allianz Energie, werden wir bezahlbare Lösungen für den Energieumbau liefern, Energiespeicher marktfähig machen. Wir arbeiten auch in Zukunft an noch effizienteren Technologien für PV- und solarthermische Systeme und Kraftwerke. Was wir bereits im vergangenen Jahr hierzu beigetragen haben, möchte ich Ihnen im Folgenden an ausgewählten Beispielen aufzeigen.

2011 konnten wir in verschiedenen Studien mit und für Partner aus Wirtschaft, Industrie und Politik regional und international wegweisende Ergebnisse veröffentlichen. Zu diesen Studien zählte u. a. der »Energieentwicklungspfad für Baden-Württemberg«, in dem wir Möglichkeiten für eine Umstellung des Energiesystems in Baden-Württemberg aufzeigen. Heute sind wir – unter der grün-roten Landesregierung – optimistischer denn je, diese Möglichkeiten auch in die Realität umzusetzen. In einer weiteren Studie untersuchten wir – gemeinsam mit dem Fraunhofer ISI – für die Weltbank die energiepolitischen und volkswirtschaftlichen Potenziale solarthermischer Kraftwerke in den MENA-Staaten (s. S. 56).

Auch mit wissenschaftlichen Konferenzen haben wir 2011 einen wichtigen Beitrag für die Weiterentwicklung der erneuerbaren Energien geleistet. Premiere feierte die »SiliconPV – International Conference on Silicon Photovoltaics«, an der 450 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 17 Ländern teilnahmen. Im April 2012 wird diese Konferenzreihe im belgischen Leuven fortgesetzt. Der »Solar Summit Freiburg« fand 2011 bereits zum vierten Mal statt und bot neben einem

Gesamtüberblick über aktuelle Entwicklungen der wichtigsten Solartechnologien einen vertiefenden Einblick in die Organische Photovoltaik. Diese Veranstaltung wird im Oktober 2012 in Freiburg fortgesetzt.

Die Arbeit unserer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, aber auch das Fraunhofer ISE als Institut, wurden 2011 wieder vielfach geehrt und ausgezeichnet:

Dr. Heribert Schmidt erhielt für die Entwicklung der »HERIC®-Topologie für Wechselrichter« den Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2011. Die Technologie erlaubt die Halbierung der Verluste bei der Umwandlung des Solarstroms von Gleichstrom in einspeisefähigen Wechselstrom und führte 2009 zu einem Wirkungsgradweltrekord von über 99 Prozent. Diese Technologie wird bereits vielfach in Solarwechselrichtern eingesetzt (Abb. 1). Dr. Frank Dimroth wurde gemeinsam mit Fraunhofer-Forschern und Kollegen des Carnot-Instituts der deutsch-französische Wirtschaftspreis 2011 verliehen. Sie wurden für ihre Arbeit zum Thema »Wiederverwendbare Substrate für III-V Mehrfachsolarzellen« ausgezeichnet. Dr. Andreas Bett, Hansjörg Lerchenmüller (SOITEC), Dr. Klaus-Dieter Rasch (AZUR SPACE) waren 2011 mit dem Thema »Konzentratorphotovoltaik mit höchsteffizienten Solarzellen« unter den Finalisten für den Deutschen Zukunftspreis. Eine Auszeichnung, über die ich mich persönlich und im Namen unseres Instituts sehr freue, verlieh die »WirtschaftsWoche«, die mich zum wichtigsten Forscher der Energiewende kürte. Auch das Fraunhofer ISE erhielt in unserem Jubiläumsjahr einen Preis und wurde – bereits zum zweiten Mal – als »Ausgewählter Ort 2011« des Innovationswettbewerbs »Deutschland – Land der Ideen« ausgezeichnet.



Während der Feier unseres 30jährigen Jubiläums konnten wir die Ernennung von langjährigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern zu Fellows des Fraunhofer ISE bekanntgeben. Dies sind: Dr. Andreas Hinsch, Michael Köhl, Prof. Dr. Roland Schindler, Dr. Heribert Schmidt, Prof. Dr. Gerhard Willeke und Dr. Helen Rose Wilson. Sie werden in dieser Funktion das Fraunhofer ISE bei seiner weiteren Entwicklung als interne wissenschaftliche Berater begleiten. Dr. Florian Clement, Dr. Stefan Henninger, Sebastian Herkel, Felix Jeremias, Florian Kagerer und Dr. Peter Schossig erhielten die Fraunhofer-Exzellenzzulagen 2011.

Folgende strukturellen Veränderungen für die Zukunft haben wir am Fraunhofer ISE 2011 vollzogen:

Zu den bislang sieben Geschäftsfeldern ist ein weiteres hinzugekommen. Das neue Geschäftsfeld »Photovoltaische Module und Systeme« wird von Dr. Harry Wirth geleitet (s. S. 82 ff). Er hat diesen Themenbereich mit seinem Team am Fraunhofer ISE kontinuierlich auf- und ausgebaut. Am Fraunhofer CSP in Halle, das von Fraunhofer ISE und Fraunhofer IWM gemeinsam geführt wird, hat Dr. Peter Dold die Leitung des »Labors für Kristallisationstechnologie (CSP-LKT)« übernommen (s. S. 12). Zwei Kollegen aus dem Bereich »Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik« erhielten einen Ruf an Hochschulen. Dr. Jens Pfafferott hat den Ruf an den Lehrstuhl für »Energieeffizienz in der industriellen Medienversorgung« der Hochschule Offenburg angenommen. Sebastian Herkel erhielt einen Ruf auf eine W3-Professur »Klima-Engineering« an die Hochschule für Technik in Stuttgart, wird dem Fraunhofer ISE zu unserer Freude aber auch in Zukunft erhalten bleiben.

- 1 *Ausgezeichnet mit dem Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2011: Dr. Heribert Schmidt für die Entwicklung der »HERIC®-Topologie für Wechselrichter«.*
- 2 *Nominiert für den Deutschen Zukunftspreis 2011: Dr. Andreas Bett, Hansjörg Lerchenmüller (SOITEC), Dr. Klaus-Dieter Rasch (AZUR SPACE) für das Thema »Konzentratorphotovoltaik mit höchsteffizienten Solarzellen«.*

Mit seinen Forschungseinrichtungen und -ergebnissen, einem Betriebshaushalt von 61,3 Mio. Euro und einer Belegschaft von 1139 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern ist das Fraunhofer ISE heute besser aufgestellt denn je. Der Photovoltaik (PV)-Weltmarkt wächst um 40–60 Prozent pro Jahr und hat von allen erneuerbaren Energien die schnellste Kostensenkung durchlaufen. In den vergangenen sieben Jahren hat sich der Preis für Solarstrom halbiert. Trotz immer wieder aufkommender Kritik und Polemik seitens der Politik und den Medien bin ich der Überzeugung, dass Deutschland die Forschungskraft und das Durchhaltevermögen hat, die grüne Transformation des Energiesystems mit Hilfe von PV und anderen erneuerbaren Energien zu meistern. Wir sind uns dieser neuen Dimension und einmaligen Chance bewusst und werden uns auch 2012 100prozentig für 100 Prozent erneuerbare Energien einsetzen.

Abschließend möchte ich all denen danken, die uns in den vergangenen dreißig Jahren kontinuierlich gefördert und maßgeblich unterstützt haben: unseren Kuratoren und Stipendiengern, unseren Ansprechpartnern in den Ministerien auf Bundes- und Länderebene sowie den Projektträgern, ganz besonders unseren Industriepartnern.

Uwe Eiche Wirth

INHALTSVERZEICHNIS

- 8 Organisationsstruktur
- 10 Das Institut im Profil
- 12 Fraunhofer CSP: Labor für Kristallisationstechnologie
- 14 Renewable Energy Innovation Policy
- 15 Kuratorium
- 16 30 Jahre Fraunhofer ISE
- 17 Ehrungen und Preise
- 18 FuE-Höhepunkte

20 ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE UND GEBÄUDETECHNIK

- 24 Neues Energiekonzept für einen Lebensmittelmarkt
- 25 Modellhafte Stadtquartierssanierung Freiburg Weingarten-West
- 26 Gebäudeintegrierte PV: Berechnungsverfahren, Konzepte und Produkte
- 28 LowEx-Systeme für Bürogebäude: Raumkomfort und energieeffiziente Kühlung
- 29 Monitoring von Versorgungssystemen mit Wärmepumpen
- 30 Hocheffiziente thermisch angetriebene Luftentfeuchtung
- 31 Kältespeicher mit Phasenwechsel-Slurries
- 32 Adsorption von Alkoholen an Aktivkohlen für thermische Wärmepumpen
- 33 Neuartige Sorptionsmaterialien und Beschichtungen
- 34 Verdampferentwicklung für Adsorptionskältemaschinen
- 35 Solare Kühlung mit konzentrierenden Kollektoren

**36 ANGEWANDTE OPTIK UND
FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN**

- 40** Charakterisierung nanoporöser Antireflexschichten
- 42** Temperaturkorrosion an Spiegelschichten für Sekundärspiegel
- 44** ITO-freie transparente Elektroden für organische Solarzellen
- 45** Fresnellinsen mit hoher Effizienz trotz Temperaturvariation

46 SOLARTHERMIE

- 50** Solare Prozesswärme: Anlagen-Monitoring und Planungshilfen
- 52** SolarAktivhaus – Heizen mit hohen solaren Deckungsanteilen
- 53** Stahlabsorber auf Basis partiell plattierter Hybridhalbzeuge
- 54** Hocheffiziente Luftkollektoren zur Heizungsunterstützung
- 55** Betriebserfahrungen mit Membrandestillationsanlagen
- 56** Solarthermische Kraftwerke – ein Gewinn für alle
- 57** Hochtemperaturspeicherkonzept mit Phasenwechselmaterialien

58 SILICIUM-PHOTOVOLTAIK

- 62** Doping Engineering für multikristallines Blocksilicium
- 63** Drahtsägenprozessentwicklung für die Waferherstellung
- 64** Kristalline Silicium-Dünnschichtsolarzellen
- 65** Niedertemperatur-Dünnschichtsilicium
- 66** Quasistatische Lumineszenz zur präzisen Lebensdauerermessung
- 67** Durchbrüche in Modulen aus multikristallinen Siliciumsolarzellen
- 68** Qualitätskontrolle von Czochralski Siliciumwafern
- 69** Oberflächenreinigung und -charakterisierung
- 70** Vorhersage der Solarzellenparameter aus Lebensdauerermessungen
- 71** Funktionale PECVD Schichtsysteme
- 72** Gesputtertes Aluminiumoxid zur Passivierung von Solarzellen
- 73** Durchlauftempern – Hoher Durchsatz und kontrollierte Atmosphäre
- 74** Passivierte MWT-Solarzellen mit dispensten Vorderseitenkontakten
- 76** Feinliniendruck und Metallpastenentwicklung
- 77** Hocheffiziente Siliciumsolarzellen mit Ionenimplantation
- 78** Lokale Bordotierungen für hocheffiziente Siliciumsolarzellen
- 79** Tandemsolarzellen basierend auf kristallinem Silicium
- 80** Photonenmanagement-Strukturen für Siliciumsolarzellen

82 PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND SYSTEME

- 86 TopMod: Effiziente Modultechnologie für minimalen Wirkungsgradverlust
- 87 Alterungsuntersuchungen an polymeren Solarabsorbermaterialien
- 88 Potentialinduzierte Degradation (PID): Schnell- und Langzeittests
- 89 Ist eine Performance Ratio von mehr als 90 Prozent machbar?
- 90 Präzise Leistungsmessung für Dünnschicht-PV-Module
- 91 Verschmutzung von PV-Anlagen: (k)ein Problem?

92 ALTERNATIVE PHOTOVOLTAIK- TECHNOLOGIEN

- 96 Fertigungsprozesse für Flatcon®-Module mit Sekundäroptiken
- 97 Konzentratoren-PV-Module zur Kogeneration von Strom und Wärme
- 98 Entwicklung und Charakterisierung von Weltraumsolarzellen
- 99 Charakterisierung und Modellierung von Nanowire-Solarzellen
- 100 Entwicklung von durchkontaktierten organischen Solarmodulen
- 101 Farbstoffsolarmodule – photovoltaisch aktives Architekturglas
- 102 Neue Simulationsmodelle für ein besseres Photonenmanagement

104 REGENERATIVE STROMVERSORGUNG

- 108 Bidirektionale Netzintegration von Elektrofahrzeugen
- 109 Flexibler Betrieb von dezentralen Erzeugern im Smart Grid
- 110 Energieeffizienz durch intelligente Stromzähler
- 111 Speicherstudie für eine regenerative Stromversorgung
- 112 Lithium-Ionen-Batteriesystem für Elektrofahrzeuge
- 113 Dynamischer Betrieb einer PV-versorgten Umkehrosmoseanlage
- 114 Systemtechnik für die autarke Energieversorgung der Zukunft
- 116 Hocheffizientes und kompaktes Ladegerät

118 WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

- 122 Aufbau einer 700 bar Wasserstofftankstelle mit Elektrolyse
- 123 Neuer Hochdruck-Elektrolysestack zur effizienten H₂-Produktion
- 124 Simulationsgestützte Auslegung von Redox-Flow-Batterien
- 125 AMES-Power: Portables Brennstoffzellensystem
- 126 Statistische Lebensdaueruntersuchung an PEM-Brennstoffzellen
- 127 Wasserstoff und Kraftstoffe aus biogenen Reststoffen
- 128 BioSyn Biomassevergaser produziert teerfreies Synthesegas

130 SERVICEBEREICHE

- 134** Kalibrieren von Solarzellen nach internationalen Standards
- 135** Kalibrieren von PV- und Konzentratormodulen
- 136** TestLab PV Modules erweitert Prüfkapazitäten weltweit
- 137** Prüfen und Mitgestalten am Testlab Solar Thermal Systems
- 138** Vermessung von Fassaden und transparenten Bauteilen
- 139** Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken
- 139** Batterie-Prüflabor
- 140** Wechselrichterlabor
- 140** Lichtlabor
- 141** Teststand für Wärmepumpen und Verdampfer
- 141** PCM-Labor: Charakterisierung von Latentwärmespeichermaterialien
- 142** Prüflabor für Adsorptionsmaterialien und poröse Materialien
- 142** Testzentrum Brennstoffzelle

143 ANHANG

- 144** Gastwissenschaftler
- 145** Kongresse, Tagungen und Seminare
- 146** Promotionen
- 147** Nachwuchsförderung
- 148** Erteilte Patente
- 149** Vorlesungen und Seminare
- 150** Bücher
- 151** Reviewed Journals
- 160** Vorträge



ORGANISATIONSTRUKTUR

Die Organisationsstruktur des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE basiert auf zwei parallel verlaufenden, sich wechselseitig ergänzenden Komponenten: den Geschäftsfeldern und den wissenschaftlichen Bereichen. Die Außendarstellung unseres Instituts, unsere Marketingaktivitäten im Bereich FuE und vor allem unsere Strategieplanung orientieren sich an den acht Geschäftsfeldern, die die inhaltlichen Schwerpunkte unserer Forschungstätigkeiten widerspiegeln. Die wissenschaftlichen Bereiche 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 hier tätig.

In beratender Funktion wird das Fraunhofer ISE von langjährigen Begleitern und erfahrenen Experten der Solarbranche unterstützt: Prof. Dr. Adolf Goetzberger (Institutsgründer und Institutsleiter 1981–1993), Prof. Dr. Joachim Luther (Institutsleiter 1993–2006, heute Leiter des Solar Energy Research Institute of Singapore SERIS), Prof. Dr. Volker Wittwer (stellvertretender Institutsleiter 1997–2009) und Dr. Claus Beneking (ehem. Vorstandsvorsitzender ErSol Solar Energy AG).

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

KAUFMÄNNISCHER DIREKTOR

Dr. Holger Schroeter +49 761 4588-5668

PRESSE UND PUBLIC RELATIONS

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

STRATEGIEPLANUNG

Dr. Thomas Schlegl +49 761 4588-5473

ENERGIEPOLITIK

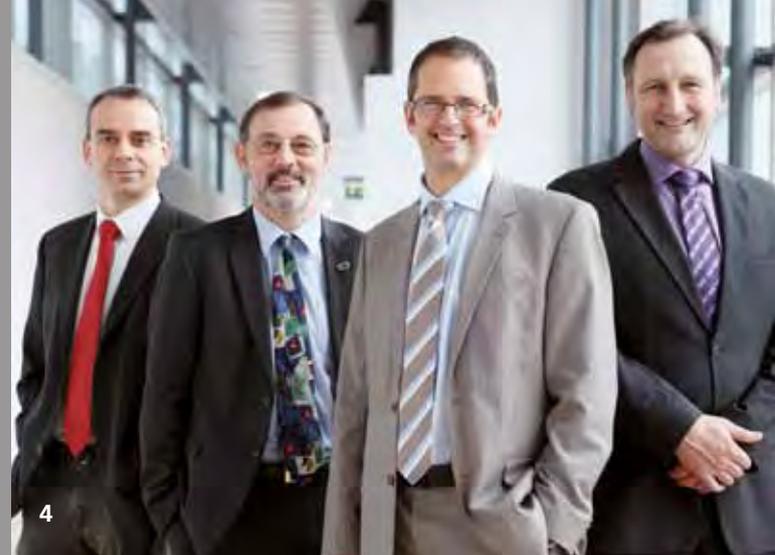
Dipl.-Phys. Gerhard Stryi-Hipp +49 761 4588-5686

KOORDINATION PHOTOVOLTAIK

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

KOORDINATION UNIVERSITÄTEN

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



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

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

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

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

WISSENSCHAFTLICHE BEREICHE

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

DAS INSTITUT IM PROFIL

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE setzt sich für ein nachhaltiges, wirtschaftliches, sicheres und sozial gerechtes Energieversorgungssystem ein. Es schafft technische Voraussetzungen für eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung, sowohl in Industrie- als auch in Schwellen- und Entwicklungsländern. Hierzu entwickelt das Institut Materialien, Komponenten, Systeme und Verfahren in den Geschäftsfeldern: Energieeffiziente Gebäude und Gebäudetechnik, Angewandte Optik und funktionale Oberflächen, Solarthermie, Silicium-Photovoltaik, Photovoltaische Module und Systeme, 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 in der 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

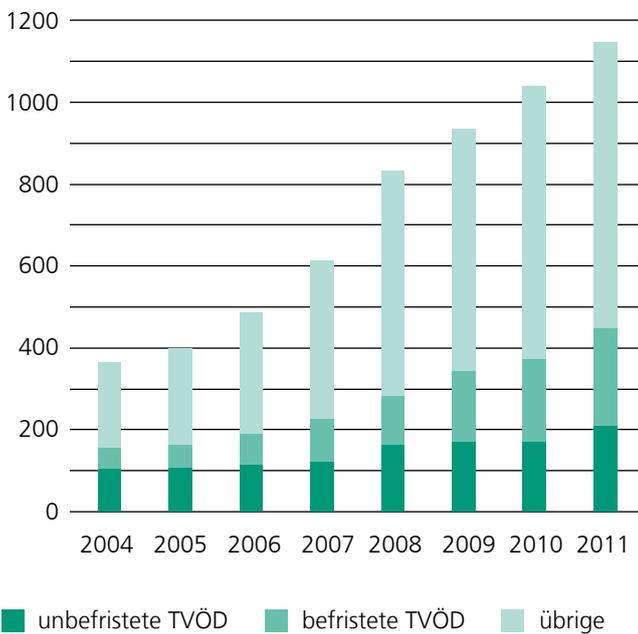
Das Labor- und Servicecenter LSC in Gelsenkirchen ist über die Landesgrenzen von NRW hinaus Partner für die Photovoltaik-Industrie. Solarzellenhersteller nutzen die Dienstleistung des LSC für die Qualitätskontrolle ihrer Produktion ebenso wie für kurzfristige Problemlösungen in der Prozesslinie. Das 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 (s. S. 65).

Das Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP in Halle/Saale wurde gemeinsam von dem Fraunhofer-Institut für Werkstoffmechanik IWM, Freiburg und Halle, und dem Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE gegründet. Das Fraunhofer IWM bringt sein Know-how auf dem Gebiet der Optimierung und Bewertung von Silicium-Prozesstechnologien und Modulintegration mit ein. Das Fraunhofer ISE bietet seine Kompetenzen in der Materialherstellung, Solarzellen- und Modulentwicklung sowie Charakterisierung an. Zentrale Einrichtungen sind der Bereich »Zuverlässigkeit und Technologien für Netzparität« (CSP-ZTN) und das »Labor für Kristallisationstechnologie« (CSP-LKT) (s. S. 12).

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.

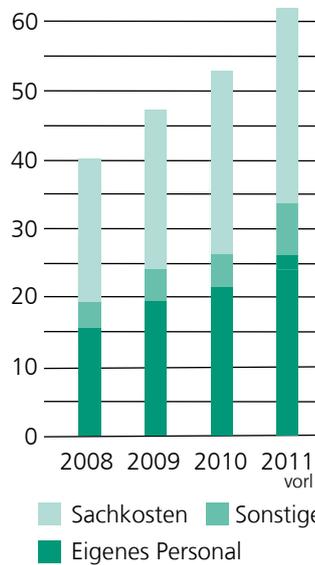
Das Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE in Boston trägt dazu bei, in Europa etabliertes Know-how und Technologien im Bereich erneuerbarer Energien für den amerikanischen Markt weiterzuentwickeln und dort einzuführen. 2010 startete das Fraunhofer CSE gemeinsam mit der Canadian Standards Association (CSA) sowie dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut ein Testzentrum für PV-Module, das CFV Solar Test Laboratory, in Albuquerque, New Mexico.

Personal

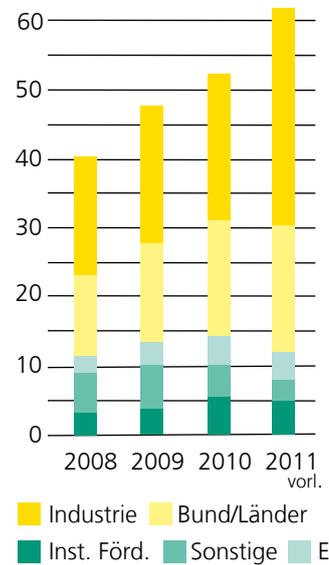


Am 31.12.2011 waren am Fraunhofer ISE insgesamt 1139 Mitarbeiter beschäftigt. Davon unterstützen 151 Doktoranden, 102 Diplomanden, 52 Praktikanten, 11 Auszubildende, 282 wissenschaftliche Hilfskräfte sowie weitere 113 Mitarbeiter (z. B. Gastwissenschaftler) die Arbeit in den Forschungsprojekten und tragen wesentlich zu den wissenschaftlichen Ergebnissen bei. Das Fraunhofer ISE leistet auf diese Weise einen wichtigen Beitrag zur Ausbildung von Forschern in diesem wichtigen Arbeitsgebiet.

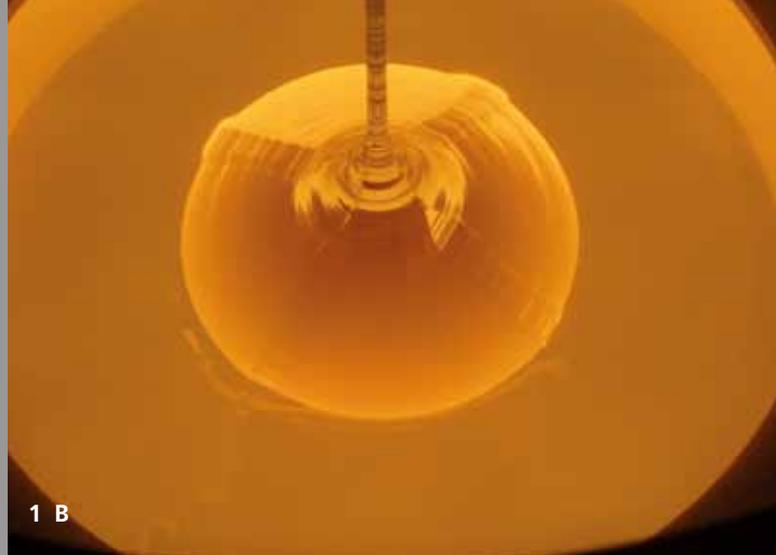
Kosten Mio €



Erträge Mio €



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 61,3 Millionen Euro. Zusätzlich zu den in der Grafik angegebenen Ausgaben tätigte das Fraunhofer ISE im Jahr 2011 Investitionen in Höhe von 7,7 Millionen Euro (ohne Bauinvestitionen und Konjunkturprogramme).



FRAUNHOFER CSP: LABOR FÜR KRISTALLISATIONSTECHNOLOGIE

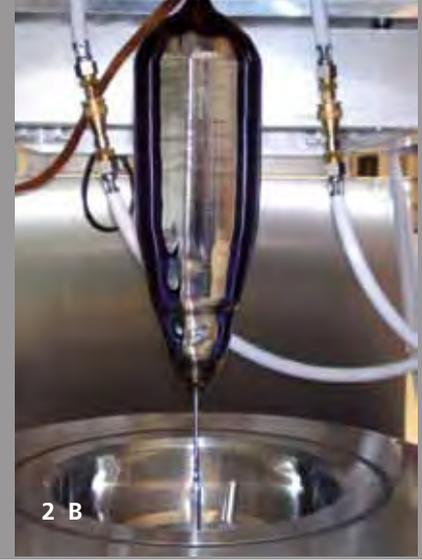
Das Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP in Halle wird gemeinsam vom Fraunhofer ISE und Fraunhofer IWM geführt. Im Labor für Kristallisationstechnologie LKT des Fraunhofer CSP stehen modernste Anlagen für die Kristallisation von Silicium für die Photovoltaik zur Verfügung. In industriellen Kristallisationsanlagen stellen wir monokristalline Ingots nach dem Czochralski- und Float-Zone-Verfahren her sowie multikristalline Blöcke nach der Vertical Gradient Freeze-Methode. Neben Fragen zu Tiegelstandzeiten, zur Qualität von Feedstock-Material und Analysen von Restverunreinigungen messen wir der Effizienzsteigerung durch die Etablierung von n-Typ Silicium und der Entwicklung von quasi-monokristallinen Blöcken eine hohe Bedeutung für die Entwicklung der Photovoltaik der kommenden Jahre zu.

Rainer Barth, Roland Kunert, Joachim Prause, Stefan Wieczorek, Heiko Wust, **Peter Dold**

Die Arbeitsgebiete des Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP untergliedern sich in die zwei Bereiche »Zuverlässigkeit und Technologien für Netzparität« (CSP-ZTN) unter Leitung von Prof. Dr. Jörg Bagdahn, das organisatorisch dem Fraunhofer IWM zugeordnet ist, und »Labor für Kristallisationstechnologie« (CSP-LKT). Das CSP-LKT forscht, unter Leitung von Dr. Peter Dold, in enger Abstimmung mit dem Fraunhofer ISE, 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, mit der wir Cz-Ingots mit ca. 60 kg Gewicht bei ca. 205 mm (8") Durchmesser und einer Länge von ca. 60 cm herstellen können. Die Erweiterung auf 9" Durchmesser ist im Aufbau und wird uns die Möglichkeit geben, Full-Square Mono-Wafer bereitzustellen. Die Schwerpunkte der Forschungsarbeiten in der Cz-Kristallisation liegen auf Untersuchungen zur Wechselwirkung von Schmelze und Tiegel, zum Einbau und Transport von Sauerstoff in den Kristall und zu Fragen der Prozessoptimierung und Reduktion der Prozesszeit. Eine weitere wichtige Fragestellung ist die Analyse von Feedstock-Material unterschiedlicher Hersteller, z. B. auch zur Verarbeitung von UMG-Silicium für die Kristallisation von Mono-Ingots. Darüber hinaus bieten wir die gezielte Herstellung von Kristallen an, die entsprechend der Spezifikation unserer Kunden gezüchtet werden, sei es im Hinblick auf Dotierung, Durchmesser oder Prozessparameter.



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 bislang 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 Feedstock-Materialien, die speziell für den Einsatz in der Photovoltaik bei externen Partnern entwickelt werden. Für die Experimente stellen wir in einer Labor-Anlage (Modell FZ-14) Testkristalle mit Durchmessern bis 4" her.

Die dritte uns zur Verfügung stehende Kristallisationstechnologie ist das Vertical Gradient Freeze (VGF)-Verfahren. Dazu steht eine industrielle Anlage der Firma PVA Tepla (VGF-732 Multicrystallizer) zur Verfügung, mit der multikristalline Blöcke der Größe G4 hergestellt werden. Die dominierenden Fragestellungen liegen derzeit im Bereich »Quasi-Mono« (oder auch »Mono-Like« oder »Mono-Cast« genannt): Welches Potenzial birgt das Verfahren im Hinblick auf Effizienzsteigerung – ohne dass die Prozesskosten signifikant ansteigen? Dies erfordert u. a. die Klärung der maximalen Wiederverwendbarkeit der Keimplatten, der Minimierung der Defektdichte durch geeignetes Defekt-Engineering und der Optimierung der Heiz- und Kühlrampen. Die Arbeiten erfolgen in enger Kooperation mit den Forschungen zum VGF-Verfahren am Fraunhofer ISE auf der Größe G1/G2.

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 während des Prozesses (A) und gezogener Kristall mit Dünnhals (B).

Durch die Integration einer Restgasanalyse-Einheit in den Kristallisationsprozess sind wir in der Lage, die Freisetzung und den Abtransport von flüchtigen Bei-Produkten und Verunreinigungen, wie z. B. H_2O , CO oder auch Schwefel-, Chlor- oder Stickstoffverbindungen, als Funktion der Prozessparameter zu untersuchen. 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 des Spitzenclusters »Solarvalley Mitteldeutschland« unterstützt.

RENEWABLE ENERGY INNOVATION POLICY

Mit der gemeinsamen Einrichtung »Renewable Energy Innovation Policy« (RENIP) bündeln das Fraunhofer ISE und Fraunhofer ISI ihre Kompetenzen. Damit können beide Institute den zunehmenden Bedarf einer immer engeren Verzahnung von Technologieentwicklung und angewandter Forschung mit der ökonomischen Systemanalyse und Innovationsforschung noch besser bedienen. RENIP bietet eine neuartige Dienstleistung an, bei der Technologien vom Anfangsstadium ihrer Entwicklung und Implementierung an auf ihr späteres Innovationspotenzial auf dem Energiemarkt hin untersucht und gesteuert werden. Dies bietet Kunden aus Wirtschaft und öffentlicher Hand die Möglichkeit einer besonders effizienten und zielorientierten Forschungsarbeit oder Förderstrategie.

Die Schaffung eines nachhaltigen und versorgungssicheren Energiesystems bedeutet gleichermaßen eine große Herausforderung für Industrie, Gesellschaft und Politik. Gleichzeitig bietet sich die Chance, durch die Entwicklung und Marktpositionierung neuer Technologien die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und der europäischen Industrie zu stärken. Dies erfordert – neben weiteren technologischen Durchbrüchen – die Entwicklung geeigneter ökonomischer Strategien für die Erforschung, Demonstration und Marktdiffusion neuer Innovationen.

Mit der Studie »Stromgestehungskosten von Erneuerbaren Energien« konnte in Zusammenarbeit der beiden Fraunhofer-Institute eine Bewertung mit guter Vergleichsbasis für verschiedene erneuerbare Energietechnologien geschaffen werden. RENIP beschränkt sich mit eigenen aktuellen Analysen dabei nicht nur auf Deutschland, sondern bezieht auch den europäischen und mediterranen Raum, wie Ägypten, Jordanien, Marokko und die Türkei mit ein.

Unter dem Titel »MENA Assessment of Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power (CSP) Projects« (s. S. 56) hat RENIP für die Weltbank eine Studie erarbeitet, die nun als Standardwerk im Bereich der lokalen Wertschöpfung

für erneuerbare Energien verwendet wird. Darin werden die Potenziale der gesamten Wertschöpfungskette, von der Planung eines neuen Solarkraftwerks, über die Errichtung bis zur Produktion der Komponenten, betrachtet und ein detaillierter Aktionsplan zur Erschließung der energiepolitischen und volkswirtschaftlichen Potenziale entwickelt. Aufbauend auf dieser Arbeit kooperiert RENIP mit einzelnen MENA-Staaten und der Industrie bei der Realisierung von technologischen Lösungen im Bereich der Solarenergie und geeigneten Markteintrittsstrategien sowie der technischen Marktintegration von erneuerbaren Energien. Neben diesen grundlegenden Arbeiten über den Aufbau und die Integration von erneuerbaren Energietechnologien in den Strommarkt begleitet RENIP auch Untersuchungen zur Ausgestaltung von politischen Maßnahmen zur Erhöhung der Gebäudesanierung.

RENIP bietet

- Länderanalysen basierend auf Modellierung und ökonomischer Bewertung von erneuerbaren Energien
- Markt- und Industriepotenzialermittlung solarer Energietechnologien
- Ausarbeitung von Implementierungsstrategien und politischen Rahmenbedingungen

KURATORIUM

VORSITZENDER

Dr. Hubert Aulich

PV Crystalox Solar GmbH, Erfurt

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

Berater Applied Materials
Vice-President EPIA, Brüssel

Dipl.-Ing. Wilfried Jäger

VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Offenbach

Ministerialrat Dr. Knut Kübler

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi),
Bonn

Dr. Ralf Lüdemann

SolarWorld Innovations GmbH, Freiberg

STELLVERTRETENDER VORSITZENDER

Dipl.-Ing. Helmut Jäger

Solvis GmbH & Co. KG, Braunschweig

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 Staiß

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

Das Kuratorium begutachtet die Forschungsprojekte
und berät die Institutsleitung und den Vorstand der
Fraunhofer-Gesellschaft bezüglich des Arbeitsprogramms
des Fraunhofer ISE (Stand: 24.10.2011).



30 JAHRE FRAUNHOFER ISE

2011 feierte das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE sein 30jähriges Bestehen. Was am 1. Juli 1981 als Vision von Institutsgründer Prof. Dr. Adolf Goetzberger und einem Team aus rund 20 Forschungspionieren in Freiburg begann, ist heute mit rund 1100 Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern das größte Solarforschungsinstitut Europas und das zweitgrößte Institut der Fraunhofer-Gesellschaft. Diese Erfolgsgeschichte haben wir im Juli 2011 mit einem Festakt und einem »Tag der offenen Tür« gefeiert.

Als Prof. Dr. Adolf Goetzberger 1981 das Fraunhofer ISE gründete, legte er gleichzeitig den Grundstein für die Photovoltaik-Forschung. Das ehrgeizige und damals viel belächelte Ziel lautete »von fossilen und nuklearen Energiequellen wegzukommen – mit erneuerbaren Energien«. Auf die »solare Eiszeit«, so Festredner Dr. Knut Kübler, Ministerialrat im Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie, über die Anfangsjahre unter Prof. Dr. Adolf Goetzberger, folgten die »solare Übergangsphase« unter Prof. Dr. Joachim Luther, der das Institut auf wirtschaftlich erfolgreichen Kurs brachte, und schließlich die »solare Warmzeit« unter dem heutigen Institutsleiter Prof. Dr. Eicke R. Weber.

Das Fraunhofer ISE hat in seiner 30jährigen Geschichte viele wissenschaftliche Höchstleistungen erbracht: das erste energieautarke Solarhaus 1992, den Weltrekord für multikristalline Siliciumsolarzellen mit 20,3 Prozent 2004, die erste solare Kühlung 2001, den Wirkungsgradweltrekord für Wechselrichter mit 99,03 Prozent und den Wirkungsgradweltrekord für Konzentratorzellen mit 41,1 Prozent – beide 2009. Im gleichen Jahr wurde Prof. Dr. Adolf Goetzberger vom Europäischen Patentamt für sein Lebenswerk geehrt und als »Inventor of the Year« ausgezeichnet.

Zur Erfolgsbilanz zählen auch die Unternehmen, die das Fraunhofer ISE gegründet hat – mehr als ein Dutzend an der Zahl. Erfolgreichstes Beispiel ist die Freiburger Soitec Solar, früher

1 *Rund 400 geladene Gäste kamen zur Jubiläumsfeier anlässlich des 30jährigen Bestehens des Fraunhofer ISE.*

2 *Auf 30 Jahre Fraunhofer ISE: Feuertänzer ließen für das Geburtstagskind die Funken sprühen.*

Concentrix. Die ehemalige Ausgründung des Fraunhofer ISE ist heute Weltmarktführer für Konzentratormodule.

Im Dreieck Forschung, Industrie und Politik ist das Fraunhofer ISE ebenfalls zu einer treibenden Kraft geworden. Das Institut ist heute weltweit einer der wichtigsten Impulsgeber und Forschungspartner für eine Energieversorgung aus 100 Prozent erneuerbaren Energien.

Um diese Bilanz zu feiern, kamen rund 400 geladene Gäste aus Forschung, Wirtschaft und Politik nach Freiburg. Unseren »Tag der offenen Tür« besuchten rund 1000 interessierte Bürgerinnen und Bürger. In diesem Sinne – auf weitere 30 erfolgreiche Jahre!



EHRUNGEN UND PREISE

Dr. Heribert Schmidt zählt zu den Preisträgern des Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2011. Er wurde anlässlich der Fraunhofer-Jahrestagung am 26.5.2011 in Nürnberg für die Entwicklung der »HERIC®-Topologie für Wechselrichter« ausgezeichnet. Diese Technologie erlaubt die Halbierung der Verluste bei der Umwandlung des Solarstroms von Gleichstrom in einspeisefähigen Wechselstrom und führte 2009 zu einem Wirkungsgradweltrekord von über 99 Prozent.

Dr. Stefan Lindekugel erhielt mit Kollegen den Poster Award der 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (PVSEC). Die Auszeichnung wurde auf der PVSEC (5.–9.9.2011) in Hamburg übergeben. Thema: »Solid Phase Crystallization and Rapid Thermal Annealing Processes for Crystalline Silicon on Glass in a Movable Two Sided Halogen Lamp Oven«.

Der SolarWorld Junior Einstein-Award ging 2011 an **Dr. Paul Gundel** (Alumnus) für sein Konzept zur »Entwicklung einer neuen mikroskopischen Messmethode für die Charakterisierung von Solarzellen«. Auch dieser Preis wurde am 5.9.2011 anlässlich der PVSEC in Hamburg verliehen.

Mit dem 2. Platz des Deutschen Studienpreises der Körber Stiftung wurde 2011 **Dr. Wolfgang Guter** (Alumnus) für seine Dissertation über die »Optimierung von III-V-basierten Hochleistungssolarzellen« ausgezeichnet. Die Preisverleihung fand am 8.11.2011 in der Parlamentarischen Gesellschaft in Berlin statt.

¹ Unter den Preisträgern des Joseph-von-Fraunhofer-Preis 2011: **Dr. Heribert Schmidt** (Erste Reihe Dritter von rechts). Er wurde für die Entwicklung der »HERIC®-Topologie für Wechselrichter« ausgezeichnet.

Kurt-Ulrich Ritzau erhielt für seine Diplomarbeit den Nachhaltigkeitspreis der Universität Tübingen. Der Preis wurde am 11.11.2011 in Tübingen überreicht. Thema: »Herstellung, Analyse und Optimierung einer Silicium-Hetero-Solarzelle mit multikristallinem Absorber«.

Dr. Frank Dimroth wurde gemeinsam mit Fraunhofer-Forschern und Kollegen des Carnot-Instituts »Laboratoire d'électronique des technologies de l'information CEA-LETI« der deutsch-französische Wirtschaftspreis 2011 verliehen. Sie wurden für ihre Arbeit zum Thema »Wieder- verwendbare Substrate für III-V Mehrfachsolarzellen« am 5.12.2011 in Paris ausgezeichnet.

Dr. Andreas Bett, Hansjörg Lerchenmüller (SOITEC), Dr. Klaus-Dieter Rasch (AZUR SPACE) waren 2011 mit dem Thema »Konzentratorphotovoltaik mit höchsteffizienten Solarzellen« unten den Finalisten für den Deutschen Zukunftspreis.

FuE-HÖHEPUNKTE

ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE UND GEBÄUDETECHNIK

- Erste Umsetzung eines Kältespeichers auf der Basis von Phase Change Slurries in technischem Maßstab (5 m³)
- Energiekonzept für weltweit erstes Wohnhochhaus, das auf Passivhaus-Standard saniert wurde (Freiburg-Weingarten, Bugginger Straße 50)
- Synthese von metall-organischen Gerüstmaterialien, die einen Weltrekord in der Wasseraufnahme erreichten (1,4 g Wasser pro g Material)

ANGEWANDTE OPTIK UND FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN

- Erfolgreicher Rollen-Nanoimprint von Ätzmasken für »Honeycomb«-Texturen auf multikristallinen Siliciumsubstraten der Größe 156 x 156 mm²
- Herstellung diffraktiver Rückseitengitter in Silicium mittels Interferenzlithographie, Nanoimprint und Plasmaätzen sowie Nachweis der Absorptionserhöhung durch diese photonischen Strukturen
- Entwicklung von selektiven Absorbern auf hochlegierten Stählen
- Fresnellinse mit verbessertem Temperaturverhalten für die Konzentration-Photovoltaik

SOLARTHERMIE

- Inbetriebnahme einer Demoanlage mit neu entwickelten Solarkollektoren mit statischem Reflektor zur Erzeugung von Prozesswärme für eine Wäscherei
- Signifikante Verbesserungen gegenüber marktverfügbarem PVT-Kollektor durch Direktlamination der c-Si-Zellen auf Alu-Rollbondabsorber mit fraktalen Kanälen
- Machbarkeit eines innovativen Latentspeicherkonzepts (für Dampfkreise) mit Schneckenwärmeübertrager zur Entkopplung der Wärmeübertragerfläche von der Speicherkapazität nachgewiesen
- Ausweitung der Optimierung von Konzentratorsystemen (Felder von Scheffler-Dishes oder Heliostaten für Turmkraftwerke) durch Strahlverfolgung

SILICIUM-PHOTOVOLTAIK

- Siliciumsolarzelle mit Kupfermetallisierung zeigt hohen Wirkungsgrad (>21%) und sehr gute Langzeitstabilität
- Laser-chemische Prozessierung erfolgreich für lokale Bordotierung eingesetzt
- n-Typ Solarzelle mit ionenimplantiertem Bor-Emitter mit einem Wirkungsgrad von 21,7 %
- Vollständig implantierte Rückseitenkontakt-Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 20 %

- TCO-freie Heterosolarzelle mit diffundierter Vorderseite und rückseitig sammelndem amorphem Silicium-Emitter mit einem Wirkungsgrad von 21,2 %
- Quasistatische Photolumineszenz-Methode steht für zuverlässige Lebensdaueremessungen für Silicium unbekannter Dotierung und Mobilität zur Verfügung
- Lokale Konzentrationen häufiger Verunreinigungen in Silicium (Eisen, Chrom, Bor/Sauerstoff) können mit abbildender Lumineszenz bestimmt werden
- Großflächige Solarzelle mit laserdotiertem selektivem Emitter, gedruckten Kontakten und laserlegierten Rückseitenkontakten mit einem Wirkungsgrad von 20 %
- MWT-PERC Solarzelle auf großflächiger bor-dotierter monokristalliner bzw. multikristalliner Siliciumscheibe mit einem Wirkungsgrad von 20,6 % bzw. 18,3 % (PV-TEC)

PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND SYSTEME

- TopMod: effiziente Modultechnologie für minimalen Wirkungsgradverlust; aus kommerziellen Siliciumsolarzellen mit einem nominellen Wirkungsgrad von 16,0 % Solarmodul aus 60 Solarzellen erstellt, Wirkungsgrad 15,2 % bezogen auf die gesamte Modulfläche, damit gingen nur 5 % relativ des ursprünglichen Zellwirkungsgrads verloren

ALTERNATIVE PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIEN

- Insitu-Dotierung für Vertical Gradient Freeze (VGF)-Verfahren
- 32 % Wirkungsgrad bei FLATCON®-Testmodul
- Herstellung des weltweit ersten Farbstoffsolarmoduls mit einer Modulgröße von 60 cm x 100 cm

REGENERATIVE STROMVERSORGUNG

- PV-Umkehrosmoseanlage auf Zypern installiert und in Betrieb genommen
- IBS66 Batteriesystem für E-Fahrzeuge aufgebaut und erfolgreich mit Ladestation und ECM demonstriert
- SmartEnergyLab nimmt erfolgreich den Betrieb auf; PV, KWK und Elektromobilität stehen für praxisnahe Versuche zur Netzintegration zur Verfügung
- Hocheffizientes bidirektionales Schnellladegerät für Elektrofahrzeuge mit 22 kW Leistung entwickelt

WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

- Übergabe eines 50 kW-Dieselformers zur Untersuchung der Dieselpartikelfilterregeneration mittels Synthesegas an die Firma MTU Friedrichshafen
- Kaltstartfähiges 100 W PEM-Brennstoffzellensystem für die Notfallmedizin
- Außeninstallation von vier Testständen zur Erfassung der Langzeit-Degradation von PEM-Brennstoffzellen durch Luftschadstoffe

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, meist 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 darin, eine viel stärkere Integration der Solaranlagen in das Gebäude und die Gebäudehülle zu ermöglichen, ohne bauliche Anforderungen, architektonische Qualität und die Lebensdauer der Bausysteme zu beeinträchtigen. Insbesondere müssen entsprechende Konzepte für den Gebäudebestand entwickelt und in die breite Anwendung geführt werden. Nicht zuletzt gilt es, Konzepte zu entwickeln, die eine möglichst geringe Belastung der Stromnetze bedingen. Die Bedeutung dieses Themas wird in Zukunft noch wachsen, wenn ein steigender Anteil an fluktuierenden erneuerbaren Energien aus Sonne

und Wind zur Stromerzeugung beiträgt. Die Entwicklung angepasster Regelungs- und Betriebsführungskonzepte ist deshalb ebenso ein wichtiges Arbeitsfeld wie die Entwicklung von neuen Speichertechnologien, die ein erhöhtes lokales Lastmanagement ermöglichen.

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 Versorgungstechniken 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 immer öfter die Integration von aktiven Komponenten einschließlich Solarwandler wie Photovoltaik oder Solarthermie in die Gebäudehülle. Die Wärmespeicherefähigkeit der Bausysteme spielt eine wichtige Rolle, um energiesparende Kühlkonzepte zu verwirklichen. Verfahren und Systeme auf der Basis von Phasenwechselmaterialien für Leichtbauten sind hier ebenso von Bedeutung wie Systeme zur thermischen Bauteilaktivierung.



Bei der Wärmeversorgung von Gebäuden spielen effiziente Wandlungstechniken eine zentrale Rolle. Sowohl elektrische als auch gasbetriebene Wärmepumpen sind aussichtsreiche Konzepte, insbesondere für energieeffiziente Gebäude, die mit einer Niedertemperaturheizung versorgt werden können. Thermische Solarenergie kann neben der solaren Brauchwassererwärmung und der Heizungsunterstützung auch für die sommerliche Klimatisierung genutzt werden, ein Konzept, das insbesondere für sonnenreiche Regionen mit hohem Kühlbedarf aussichtsreich ist. Eine architektonisch anspruchsvolle Integration von Photovoltaik in die Gebäudehülle ist eine zentrale Aufgabe, um zu einer breiten Nutzung bei hoher Akzeptanz zu verhelfen.

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 fortwährend 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.

In Zusammenarbeit mit Architekten, Fachplanern und der Industrie entwickeln wir Konzepte für die Gebäude von morgen. Wir verfolgen einen integralen Planungsansatz, um hinsichtlich Wirtschaftlichkeit, Energieeffizienz und

In der energetischen Sanierung von Gebäuden werden zukünftig multi-funktionale Fassaden eine wichtige Rolle spielen. Dabei werden neben Wetter- und Wärmeschutz weitere Funktionen in die Fassade integriert und somit bauliche Maßnahmen im Inneren der Gebäude vermieden. Aus Kostengründen sollten einfach zu installierende Systeme mit hohem Vorfertigungsgrad verwendet werden. Im Rahmen eines durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) geförderten Projekts haben wir eine Fassadendämmung mit integrierten Zu- und Abluftkanälen zur Sicherstellung des hygienischen Luftwechsels mit Wärmerückgewinnung entwickelt. Neben den Wärmedämmplatten mit integrierter Kanalführung weisen auch die Fensterelemente inklusive Fassaden- und Dämmanschluss eine hohe Vorfertigung auf. Eine Prototyp-Installation wurde gemeinsam mit unseren Industriepartnern Beck & Heun sowie Zehnder an einem Bestandsgebäude des Fraunhofer ISE durchgeführt.

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 netzgebundene Lösungsansätze geht. Dementsprechend haben wir den Fokus unserer Aktivitäten ausgedehnt. Die internationalen Rahmenbedingungen für diese Ansätze entwickeln wir u. a. durch unsere Mitarbeit in Projekten der Internationalen Energieagentur IEA.

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. Doreen Kalz	Telefon +49 761 4588-5403 doreen.kalz@ise.fraunhofer.de
Energie-Versorgungsanlagen für Gebäude	Dipl.-Ing. Sebastian Herkel	Telefon +49 761 4588-5117 sebastian.herkel@ise.fraunhofer.de
Lichttechnik	Dr.-Ing. Jan Wienold	Telefon +49 761 4588-5133 jan.wienold@ise.fraunhofer.de
Gebäude-Integrierte Photovoltaik	Dipl.-Phys. Tilmann Kuhn	Telefon +49 761 4588-5297 tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de



© ALDI SÜD Rastatt GmbH



© Starredesign GmbH

NEUES ENERGIEKONZEPT FÜR EINEN LEBENSMITTELMARKT

Ungefähr 7 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalent werden in Deutschland jährlich von den Kälteanlagen des Lebensmitteleinzelhandels (LEH) emittiert. Diese Emissionen setzen sich zusammen aus den direkten Emissionen durch Kältemittelverluste und den indirekten Emissionen aus dem Energieverbrauch. Addiert man die Beiträge der Kälteerzeugung, der Beleuchtung und anderer elektrischer Geräte, sind es über 1 % der deutschen Treibhausgasemissionen, die durch den Lebensmitteleinzelhandel verursacht werden. Die Kombination unterschiedlicher Technologien im Bereich der Haustechnik, der Tageslichtnutzung und vor allem der Einsatz natürlicher Kältemittel wie CO₂ mit niedrigem Treibhausgaspotenzial können die Umweltbilanz von Supermärkten deutlich verbessern.

Sebastian Burhenne, Doreen Kalz, **Nicolas Réhault**,
Hans-Martin Henning

Für das Energiekonzept der neuen ALDI SÜD Filiale in Rastatt hat das Fraunhofer ISE in Zusammenarbeit mit dem Bauherrn und dem Planungsteam ein neuartiges Energiekonzept erarbeitet, das durch die abgestimmte Kombination zahlreicher Einzelmaßnahmen im Bereich Kälteerzeugung, Kühlmöbel, Gebäudehülle und Haustechnik den Primärenergiebedarf der neuen Filiale um 50 % gegenüber einer Standardfiliale reduzieren soll. Energieeffizienz in Supermärkten wird vor allem durch eine effiziente Bereitstellung der Gewerbekälte und durch die Nutzung von Potenzialen zur Wärmerückgewinnung und Abwärmenutzung erreicht. Sowohl die Kälteerzeugung als auch die Kühlmöbel wurden bei der neuen Filiale hinsichtlich energetischer Kriterien ausgewählt und entwickelt. Weiterhin wurden Dachkuppeln mit einem hochreflektierenden Microraster im Scheibenzwischenraum der Wärmeschutzverglasung eingesetzt. Dies gewährleistet eine gute Durchsicht und gleichzeitig den nötigen Sonnenschutz.

1 Die neue ALDI SÜD Filiale in Rastatt.

2 Innenansicht der Filiale: Dachkuppeln mit Microraster und Remote-Kühltruhen, die mit CO₂ versorgt werden.

Beim Kunstlicht wird neben dem Einsatz hocheffizienter Leuchtmittel eine tageslichtabhängige Regelung realisiert. Im Kern des Konzepts steht ein geothermisch gestützter CO₂-Kälteverbund, der mittels Strom als alleinige Energieversorgung alle Energiedienstleistungen im Bereich Wärme und Kälte abdeckt. Durch die Nutzung von Abwärme aus der Kälteerzeugung und der Erdoberflächwärme konnten die sonst üblichen Versorgungsanlagen, z. B. ein Gaskessel zur Beheizung und ein Klimagerät zur Kühlung des Marktes, entfallen. Ein Schwachpunkt von CO₂-Kälteanlagen ist, dass sie im Falle eines außenluftgekühlten Gaskühlers bei hohen Außentemperaturen deutliche Einbußen bei der Leistungszahl aufweisen. Dieser Effekt wird im Projekt durch die Kombination mit einer Erdsonden-Anlage zur Unterkühlung des Kältemittels reduziert.

Die zweijährige Monitoringphase ist kurz nach der Markteröffnung im Oktober 2010 gestartet. Die Daten zur Erstellung von Energiebilanzen und zur Betriebsoptimierung werden kontinuierlich erfasst und ausgewertet. Optimierungspotenziale bei der Hochdruckregelung der neu entwickelten CO₂-Kälteanlage wurden identifiziert und implementiert. Auch die tageslichtabhängige Kunstlichtregelung wurde kontinuierlich in Hinblick auf eine verbesserte Energieeffizienz und einen optimalen visuellen Komfort verbessert. Im Lauf des zweiten Monitoringjahres sollen weitere Optimierungen durchgeführt werden.

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



MODELLHAFTE STADTQUARTIERSSANIERUNG FREIBURG WEINGARTEN-WEST

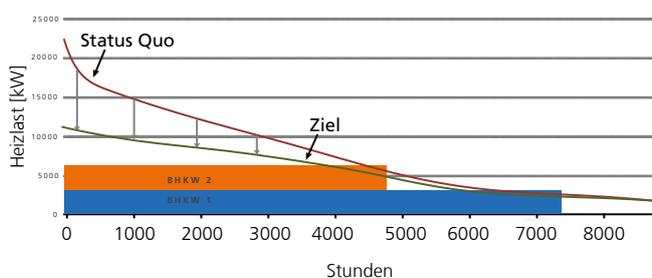
Der Stadtteil Weingarten-West wird von 2007 bis ca. 2022 energetisch saniert. Ziel des begleitenden Vorhabens ist die Planung, Umsetzung und messtechnische Analyse der energetischen Gebäudesanierung und der Energieversorgung dieses Stadtteils. Der Primärenergieverbrauch aller Energiedienstleistungen soll um 30% reduziert werden. Im Projekt werden Sanierungskonzepte für typische Gebäude aus den 1960er Jahren entwickelt und die daraus resultierende Veränderung der Wärmeversorgungsstruktur untersucht. Der Gesamt-Heizwärmebedarf des Stadtteils sinkt aufgrund der verbesserten baulichen Gebäudestandards. Dies wirkt sich insbesondere auf die Fernwärmeversorgung mit Blockheizkraftwerk (BHKW) aus. Wie der Betrieb der Fernwärme an die Veränderung angepasst werden kann, ist ebenfalls Gegenstand unserer Untersuchung.

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

Anhand von Simulationen werden die Auswirkungen des sinkenden Wärmebedarfs auf die Wärmeversorgungsstruktur dynamisch analysiert. Hierzu wurde eine Schnittstelle entwickelt, die die Topologie des Fernwärmenetzes aus dem GIS-System des Energieversorgers mit der Simulationsumgebung »modelica« koppelt. Die Untersuchungen zeigen, dass trotz Reduktion des Wärmebedarfs eine Erhöhung des Anteils von Wärme aus Kraft-Wärme-Kopplung an der gesamten Wärmeversorgung möglich ist, wenn die Konfiguration und der Betrieb des BHKW dem veränderten Lastprofil angepasst werden.

Das Absenken der Vor- und Rücklauftemperatur der Fernwärme verringert Wärmeverluste über die Leitungen. Trotz des notwendigen höheren Pumpaufwands kann insgesamt eine höhere Effizienz der Wärmeversorgung erzielt werden.

- 1 Historische Aufnahme des Stadtteils Weingarten West in Freiburg.
- 2 3D-Darstellung des Stadtteils und der Fernwärmeleitungen.

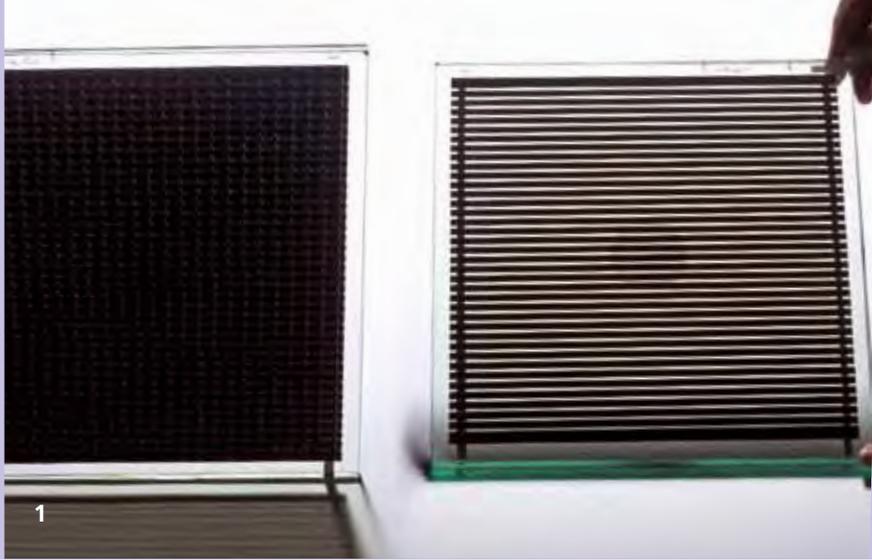


- 3 Jahresdauerlinie der Fernwärmeversorgung: Die Reduzierung des Wärmebedarfs wirkt sich insbesondere auf den BHKW-Betrieb aus.

Die Untersuchungen zeigen, dass der Wärmeverlust über die Leitungen um bis zu 15 % gesenkt werden kann, wenn die maximale Vorlauftemperatur der Fernwärme um 20 K reduziert wird.

Durch Ausbau der thermischen Speicherkapazität kann der Fernwärmebetrieb weiter optimiert werden. Verteiltes Speichermanagement unter Einbeziehen der Speichereigenschaft des Fernwärmenetzes kann die Flexibilität der Entkopplung von Strom und Wärmeerzeugung erhöhen und der BHKW-Betrieb kann stärker an den Bedarf der Strombereitstellung angepasst werden, ohne die Nutzung der Wärme zu reduzieren. Diese Fähigkeit ist ein Schlüssel für einen stabilen Betrieb zukünftiger Stromnetze mit einem stetig wachsenden Anteil an nicht planbaren Einspeisungen durch erneuerbare Energien.

Das Projekt wird im Auftrag der Freiburger Stadtbau (FSB) und der badenova Wärmeplus durchgeführt. Es wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Programm »EnEff:Stadt« gefördert.



GEBÄUDEINTEGRIERTE PV: BERECHNUNGS- VERFAHREN, KONZEPTE UND PRODUKTE

Die lokale Nutzung von erneuerbaren Energieträgern spielt eine wichtige Rolle bei der Reduktion der CO₂-Emissionen im Gebäudebestand. Dabei kommt der gebäudeintegrierten Photovoltaik eine Schlüsselrolle zu, gerade wenn es um Nullenergiegebäude geht, die im Jahresmittel eine ausgeglichene Primärenergiebilanz aufweisen. Mit der Entwicklung von innovativen Produkten, Konzepten und neuen Auslegungs- und Optimierungsverfahren unterstützt das Fraunhofer ISE die Industrie beim Ausbau dieses Marktsegments.

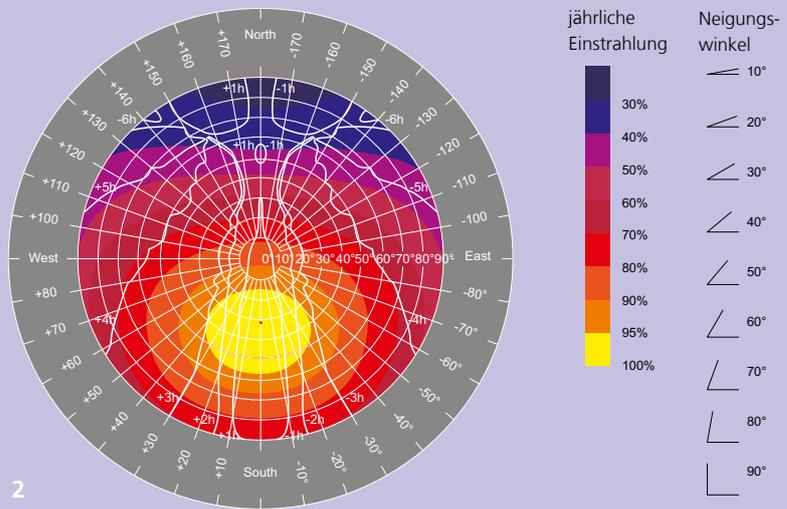
Christof Erban, Karoline Fath, **Tilmann Kuhn**, Andreas Hinsch, Wendelin Sprenger, Helen Rose Wilson, Hans-Martin Henning

Ziel der EU und der deutschen Bundesregierung ist es, bis 2050 einen nahezu CO₂-neutralen Gebäudebestand zu realisieren. Neue Gebäude sollen schon ab 2020 eine nahezu ausgeglichene Primärenergiebilanz aufweisen. Insbesondere beim Gebäudebestand ist eine deutliche Steigerung der Energieeffizienz notwendig. Gerade bei sanierten Gebäuden ist in der Regel auch nach der Sanierung immer noch ein signifikanter Primärenergiebedarf vorhanden, der in Zukunft über Primärenergiegutschriften ausgeglichen werden muss. Dies kann durch eine hohe lokale Stromproduktion auf Basis der Photovoltaik erreicht werden, weshalb neben dem Dach zunehmend auch die Fassade zur Energiegewinnung genutzt werden wird. Die Bedeutung der gebäudeintegrierten Photovoltaik (Building Integrated PV, BIPV) wird also in Zukunft massiv steigen. Zugleich müssen aus architektonischer Sicht befriedigende Lösungen entwickelt werden, um langfristig eine hohe Akzeptanz zu sichern. Das Fraunhofer ISE unterstützt diesen Trend mit neuen Auslegungs- und Optimierungsverfahren, Konzepten und der Entwicklung von innovativen Produkten.

Konzepte

Die Einbindung von Strom aus nicht regelbaren erneuerbaren Energien wie Sonne und Wind in das europäische Stromnetz ist Gegenstand von vielen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten wie E-Mobility, Smart Grids und Stromspeichern im Allgemeinen. Die Netzverträglichkeit von Strom aus Photovoltaik lässt sich jedoch auch durch Maßnahmen am Gebäude selbst erhöhen, wenn darauf geachtet wird, dass nicht alle Anlagen gleichzeitig ihre Maximalleistung erreichen (Abb. 2). Durch einen intelligenten Mix von unterschiedlich ausgerichteten Anlagen können die Einspeisung zeitlich entzerrt und gleichzeitig Kosten beim Wechselrichter eingespart werden.

¹ *Das transparente PV-Modul (PV-Shade®) hat zwei Ebenen mit PV-Streifen, wodurch zusätzlich zur Stromerzeugung winkelselektiv Sonnenschutz, Blendschutz und Aussicht realisiert werden. Um den Jahresertrag zu bestimmen, muss auch die Einstrahlung auf die hintere PV-Ebene berechnet werden.*



Neue Auslegungs- und Optimierungsverfahren

- Der Ertrag von neuartigen, innovativen Produkten mit für Fassadenanwendungen optimierten winkelabhängigen Eigenschaften (Abb. 1) kann mit den vorhandenen Berechnungsmethoden und Programmen nicht vorhergesagt werden. Deshalb wurde am Fraunhofer ISE eine neue Berechnungsmethode entwickelt.
- Auch bei BIPV-Anlagen sind die Kosten im Fokus der Entscheidungsträger. Im Rahmen des Spitzenclusters »Solarvalley Mitteldeutschland« haben wir eine Methode zur Ermittlung der Total Cost of Ownership (TCO) entwickelt, die auch Einsparungen berücksichtigt, die durch die Substitution von Gebäudehüllkomponenten durch PV-Module realisiert werden.
- Der Gesamtenergiedurchlassgrad g von transparenten BIPV-Modulen wird dadurch beeinflusst, dass durch die Solarzellen Energie aus der Fassade abgeführt wird, die nicht mehr zur Erwärmung des Raums beiträgt. Am Fraunhofer ISE wird gegenwärtig ein Verfahren entwickelt, das in erweiterten Normen verwendet werden soll und diesen Effekt berücksichtigt.
- Wesentlicher Aspekt bei transparenten PV-Modulen ist die Durchsicht. Derzeit existieren hierfür keine anerkannten Kriterien. Mit Hilfe von umfangreichen Nutzerbefragungen entwickeln wir eine Bewertungsmethode, welche die Güte der Sichtverbindung nach außen quantifiziert und die bei der Optimierung von transparenten PV-Modulen eingesetzt werden kann.

2 Jahresertrag und Zeitverschiebung der täglichen maximalen Einspeisung von PV-Anlagen bei einem Breitengrad von 48° Nord (Freiburg). Die Abbildung zeigt z. B., dass der Zeitpunkt der maximalen Einspeisung durch eine geänderte Orientierung der PV-Anlage um drei Stunden verschoben werden kann, wenn ein Minderertrag von rund 15 % in Kauf genommen wird.

Innovative Produkte

- Bekannte transparente PV-Module für die Fassade weisen eine nicht richtungsoptimierte Transparenz auf. Insbesondere besteht eine gleich gute Sichtverbindung zur blendend hellen Sonne und zur Umgebung unterhalb des Horizonts. Das neue PV-Shade®-Modul (Abb. 1) ist nur horizontal und nach unten transparent und bietet dadurch auch Blend- und Sonnenschutz. Das Element ist insbesondere für den Einsatz als transparente Brüstung konzipiert.

2011 ist es uns gelungen, semitransparente Farbstoffsolarzellen in Fassadenelemente zu integrieren und die Lebensdauer zu erhöhen (s. Beitrag S. 101). Dieser Entwicklungsschritt stellt einen wichtigen Meilenstein für diese potenziell sehr günstige PV-Technologie dar.



LowEx-SYSTEME FÜR BÜROGEBÄUDE: RAUMKOMFORT UND ENERGIEEFFIZIENTE KÜHLUNG

Gebäude, die mit Flächentemperierung in Verbindung mit der Nutzung von Umweltenergie gekühlt und beheizt werden, haben sich in den letzten Jahren etabliert. Viele erfolgreiche und gut funktionierende Beispiele belegen, dass mit diesen Systemen ein hohes Maß an thermischer Behaglichkeit in Verbindung mit einer hohen Energieeffizienz, bei Nutzung von erneuerbarer Umweltenergie, erreicht werden kann. Jedoch zeigen die Betriebserfahrungen und die systematische wissenschaftliche Auswertung einer ganzen Reihe von Projekten, dass es in Planung, Ausführung und Betrieb noch Optimierungsmöglichkeiten gibt, um das Effizienzpotenzial dieser Systeme besser auszuschöpfen.

Martin Fischer, Sebastian Herkel, **Doreen Kalz**,
Simon Winiger, Dominik Wystrcil, Sebastian Zehnle,
Hans-Martin Henning

Gemeinsam mit Industrie- und Forschungspartnern werten wir Nichtwohngebäude mit reversiblen Wärmepumpen, die das Erdreich als Wärmequelle bzw. -senke nutzen, messtechnisch aus und analysieren die Ergebnisse. Auf Basis von Langzeitmessungen und gekoppelten Gebäude- und Anlagensimulationen werden Erfolgsfaktoren und Schwachstellen in der Planung, in der Ausführung und im Betrieb dieser komplexen haustechnischen Systeme identifiziert und bewertet. Diese Erfahrungswerte fließen in Qualitätssicherungsverfahren ein. Eine Querschnittsauswertung von über zehn Nichtwohngebäuden zeigt, dass thermoaktive Bauteilsysteme in Kombination mit dem Erdreich als Umweltwärmesenke ausreichend Kühlenergie zur Verfügung stellen, um einen zufrieden stellenden thermischen Komfort und damit eine hohe Arbeitsplatzqualität zu gewährleisten – vorausgesetzt bauliche und technische Maßnahmen werden bereits in der Planungsphase gemeinsam entwickelt und im Gebäudebetrieb berücksichtigt. Kühlenergie wird weitestgehend im Direktbetrieb der Erdwärmesonden

- 1 »inHaus2« in Duisburg, Forschungsplattform der Fraunhofer-Gesellschaft. Das Gebäude und die haustechnischen Anlagen werden seit 2009 intensiv vermessen und betriebsbegleitend optimiert.
- 2 Kältezentrale im »inHaus2«. Das Gebäude wird im Sommer mittels einer reversiblen Wärmepumpenanlage in Kombination mit einem Erdwärmesondenfeld und Flächentemperierung gekühlt.

bereitgestellt und in Zeiten einer erhöhten Bedarfsanforderung durch aktive Kühlung mittels erdgekoppelter, reversibler Wärmepumpe ergänzt. Damit weisen diese Systeme einen geringen Energiebedarf für die Kühlung auf und erreichen somit eine hohe Energieeffizienz. Messtechnisch wurden in den Projekten Jahresarbeitszahlen für die aktive Kältebereitstellung (Kältemaschine plus Primärpumpe) von 4,8 bis 5,8 kWh_{therm}/kWh_{el} für die direkte Kältebereitstellung (Erdwärmesonde) von 10 bis 16 kWh_{therm}/kWh_{el} und für das Gesamtsystem einschließlich Kälteverteilung und -übergabe von 1,5 bis 8,0 kWh_{therm}/kWh_{el} nachgewiesen.

Dennoch wird deutlich, dass die Effizienz der Systeme weiter verbessert werden muss, z. B. durch konsequente Optimierung der hydraulischen Anlagen und Anlagenkomponenten sowie durch einen optimierten Wärmepumpenbetrieb. Unsere Analyse zeigt, dass sich durch eine konsequente Systemabstimmung, die effiziente Betriebsführung aller Teilkomponenten der Kühlsysteme und eine Optimierung hinsichtlich der aufgewandten Hilfsenergien bei den untersuchten Anlagen eine um ca. 34–50 % höhere Effizienz erreichen ließe. Im Betriebsmodus »direkte Kühlung« würde dies zu Jahresarbeitszahlen größer als 20 führen.

Das Projekt »LowEx:Monitor« wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

<http://lowexmonitor.ise.fraunhofer.de/>
www.inhaus.fraunhofer.de



MONITORING VON VERSORGUNGSSYSTEMEN MIT WÄRMEPUMPEN

Die steigende Anzahl neuartiger energietechnischer Versorgungsanlagen, die oftmals mit einer zunehmenden Komplexität der Systeme einhergeht, macht eine umfassende Bewertung erforderlich, die sowohl dem Gesetzgeber als auch dem Nutzer zuverlässige Aussagen zur ökologischen und ökonomischen Leistungsfähigkeit liefert. Wärmepumpensysteme in unterschiedlichen Ausführungen, z. B. im Verbund mit solarthermischen Kollektoren, sind ein Beispiel für derartige Versorgungstechniken. Neben der gesamthaften Bewertung durch Jahresarbeitszahlen sind die Hersteller vor allem an einer Analyse des Betriebsverhaltens und der Ermittlung von Optimierungspotenzialen interessiert. Zur Generierung derartiger Informationen führt das Fraunhofer ISE eine Vielzahl von Monitoring-Projekten durch. Fundierte, repräsentative Ergebnisse werden u. a. durch die breit angelegte Felduntersuchung von mittlerweile über 200 Wärmepumpenanlagen erzielt. Besonders innovative Gesamtkonzepte, wie beim Plusenergiegebäude in Kalkar, verlangen intensivere messtechnische Einzeluntersuchungen.

Danny Günther, Thomas Kramer, Robert Langner,
Christian Lumm, **Marek Miara,** Jeanette Wapler,
Hans-Martin Henning

Monitoring von Wärmepumpenanlagen

Im Rahmen des dritten Monitoring-Projekts »WP Monitor« (2009–2013) führt das Fraunhofer ISE die umfassende messtechnische Analyse von elektrisch betriebenen Wärmepumpen durch. Vorgänger waren die Projekte »WP Effizienz« (2005–2010) mit der messtechnischen Untersuchung von Wärmepumpen in neuen Gebäuden sowie »WP im Gebäudebestand« (2006–2009) mit der Bewertung von Wärmepumpen im Altbau. In Summe wurde in diesen Vorhaben nachgewiesen, dass Wärmepumpen oftmals eine Effizienz

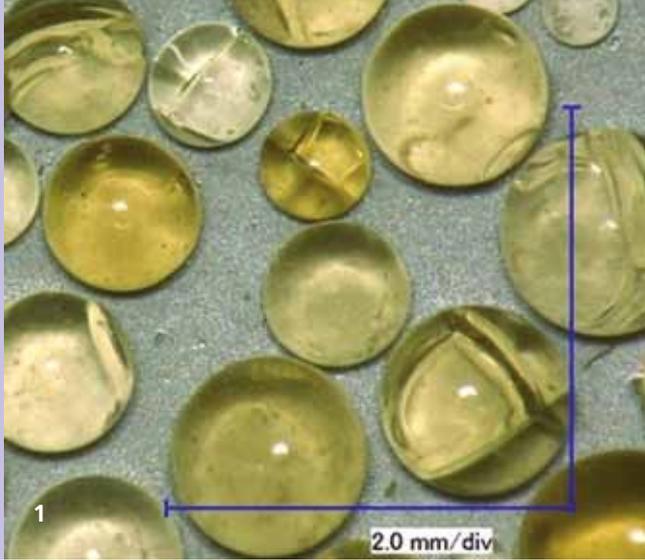
- 1 Schwimmendes Plusenergiegebäude in Kalkar.
- 2 Online-Visualisierung aktueller Messergebnisse von Wärmepumpenanlagen.

erreichen, die ihren Einsatz primärenergetisch im Vergleich zu Brennwertgeräten auf Basis fossiler Brennstoffe rechtfertigt. Es wurde jedoch auch deutlich, dass nicht alle Anlagen dieses Ziel erreichen. Die Bandbreite der Ergebnisse gibt Hinweise auf ein großes Optimierungspotenzial. Neueste Monitoring-Ergebnisse bestätigen durch höhere Effizienzwerte bereits einen Lerneffekt, vor allem in den Bereichen Auslegung und Installation. Interessierte können den realen Betrieb im Rahmen einer Online-Visualisierung nachverfolgen (Abb. 2).

Monitoring eines schwimmenden Plusenergiegebäudes

Das Architekturbüro Hülsmann & Thieme in Kleve hat ein Konzept für ein schwimmendes Plusenergiegebäude entwickelt (Abb. 1). Das Energiekonzept wurde zusammen mit dem Fraunhofer ISE erstellt, welches das Gebäude auch zwei Jahre messtechnisch begleiten wird. Dadurch kann überprüft werden, ob das Plusenergie-Ziel erreicht wurde. Das Gebäude dient zugleich als Forschungsstation für regenerative Energie- und innovative Heiztechniksysteme. Dazu gehören u. a. ein PV-System, eine solarthermische Anlage sowie eine Wärmepumpe, die den See als Wärmequelle nutzt. Insgesamt sind 105 Messstellen installiert und auf Grund der Erfassung sämtlicher Messwerte alle 90 Sekunden können auch dynamische Vorgänge gut sichtbar gemacht werden. Dies ermöglicht neben der Langzeituntersuchung auch die Überwachung des Betriebsverhaltens und somit die Identifikation von Optimierungspotenzialen.

www.wp-monitor.ise.fraunhofer.de



HOCHEFFIZIENTE THERMISCH ANGETRIEBENE LUFTENTFEUCHTUNG

Gebäudeklimatisierung umfasst die Gewährleistung kontrollierter Bedingungen von Temperatur und Feuchte in Räumen. Die Luftentfeuchtung kann hier einen bedeutenden Anteil des Energiebedarfs bei elektrisch betriebenen Standard-Klimatisierungstechnologien ausmachen. Eine ressourcenschonende Alternative stellt die Anwendung thermisch angetriebener Sorptionsverfahren dar. Das erfolgreich entwickelte Verfahren ECOS (Evaporatively Cooled Sorptive Heat Exchanger) kombiniert die Entfeuchtung der Zuluft durch ein Sorptionsmittel mit einer Temperaturabsenkung durch Verdunstungskühlung. Die sehr effektive Kühlung und Entfeuchtung bei hoher Ausnutzung der Antriebswärme konnte an Prototypen experimentell nachgewiesen werden.

Constanze Bongs, Alexander Morgenstern,
Hans-Martin Henning

Zielsetzung der Arbeiten am Fraunhofer ISE war die erfolgreiche Demonstration des patentierten Verfahrens mit dem Schwerpunkt auf der Entwicklung der Kernkomponente des Prozesses: des sorptiv beschichteten Wärmeübertragers. Die Zuluftseite eines Kreuzstrom-Wärmeübertragers wurde hierzu mit dem Sorptionsmittel Silikagel beschichtet. Strömt feuchte Außenluft durch die sorptiv beschichteten Zuluftkanäle, so lagert sich Wasserdampf aus der Luft in den Poren des Sorptionsmittels an (Adsorption). Dabei wird Wärme freigesetzt. Gleichzeitig wird in die Abluftkanäle des Wärmeübertragers Wasser eingesprüht. Durch die Verdunstung des Wassers sinkt die Temperatur der Abluft. Damit kann Wärme von der warmen Zuluft auf die kalte Abluft übertragen werden. So wird eine gleichzeitige Entfeuchtung und Kühlung der Zuluft auf behagliche Bedingungen erreicht. Da das Sorptionsmittel zunehmend feuchter wird, muss es zur Aufrechterhaltung des Prozesses durch Solarwärme getrocknet werden (Desorption).

- 1 Auf dem Wärmeübertrager fixiertes Silikagel für die sorptive Luftentfeuchtung.
- 2 Prototyp eines Kreuzstrom-Wärmeübertragers mit sorptiver Beschichtung auf der Zuluftseite.

Um lückenlos Zuluft bereitzustellen, werden in einem Gerät zwei Sorptions-Wärmeübertrager abwechselnd betrieben.

Verschiedene Prototypen von Sorptions-Wärmeübertragern wurden an dem für diesen Zweck aufgebauten Lüftungsgeräte-Teststand am Freiburger Solarhaus charakterisiert. Die Zielanwendung ist die Klimatisierung von Einfamilienhäusern oder kleineren Büros mit Luftvolumenströmen von etwa 400 m³/h. Unter Standard-Auslegungsbedingungen für Deutschland (Außenluftbedingungen: 32 °C / 12 g/kg – Temperatur/Feuchte) konnte eine Abkühlung auf 24,5 °C bei einer Entfeuchtung auf 7,5 g/kg, und somit eine Kälteleistung von 2,33 kW bei einer Leistungszahl (COP_{th}) von 0,97 erreicht werden. Die besonders gute Eignung des Prozesses für feucht-warme Klimazonen (Außenluftbedingungen: 39,3 °C / 17 g/kg) konnte ebenfalls mit einer Abkühlung von bis zu 14,2 K und Entfeuchtung um bis zu 10,2 g/kg demonstriert werden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen entwickelten wir einen Technolgie demonstator, der im Rahmen eines Kooperationsprojekts am Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS) getestet wird.

Das Projekt »Neues, hocheffizientes Verfahren zur sorptiven Luftentfeuchtung (ECOS)« wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.



KÄLTESPEICHER MIT PHASENWECHSEL-SLURRIES

Bei der Imtech Deutschland GmbH & Co. KG in Hamburg wurde erstmalig in Deutschland ein großer Phasenwechsel-Slurry Speicher in Betrieb genommen. Als Phasenwechselmaterial dient mikroverkapseltes Paraffin, das von BASF hergestellt wird. Die Schmelztemperatur des Paraffins liegt zwischen 22 und 28 °C. Die Wärmespeicherkapazität des Slurries liegt bei 16 kWh/m³, somit kann bei einer vergleichbaren Temperaturspreizung etwa doppelt so viel Wärme eingespeichert werden wie in einem Wasserspeicher gleicher Größe. Neben dem Vorwärmen oder Vorkühlen von Zuluft kann das Speichermedium auch für technische Anwendungen, z. B. das Kühlen von Maschinen genutzt werden.

Stefan Gschwander, Thomas Haussmann, Peter Schossig, Laura Vorbeck, Hans-Martin Henning

Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials, PCM) können bei nahezu konstanter Temperatur Wärme speichern und wieder abgeben, wozu der Phasenwechsel fest-flüssig genutzt wird. Als PCM werden verschiedene Materialien genutzt. Paraffine sind hydrophobe PCM, die sich sehr gut zur Herstellung einer Phasenwechsel-Flüssigkeit (Phase Change Slurry, PCS) eignen. Durch BASF werden diese Paraffine mikroverkapselt und können so einer Trägerflüssigkeit wie Wasser beigemischt werden und bilden, unabhängig vom Phasenzustand des Paraffins, eine Suspension. Diese Suspension kann wie eine konventionelle Kälteflüssigkeit durch hydraulische Komponenten wie Rohre und Wärmeübertrager gepumpt werden.

Im Projekt »Entwicklung von Kältespeichern auf der Basis von Phasenwechselmaterialien und mikroverkapselten Phasenwechselmaterialien« hat die Imtech Deutschland GmbH & Co. KG mit Unterstützung des Fraunhofer ISE eine Kälteanlage aufgebaut, deren 5 m³ Tankspeicher mit einem PCS gefüllt ist, das über

1 Phasenwechsel-Slurry Speicheranlage mit dem 5 m³ Speicher (links) und der Übergabestation (rechts), installiert bei der Imtech Deutschland GmbH & Co. KG.

2 Phase Change Slurries bestehen aus einem Phasenwechselmaterial und einer Trägerflüssigkeit. Es entsteht eine Dispersion, die unabhängig vom Aggregatzustand des Phasenwechselmaterials flüssig ist. Die Viskosität hängt hierbei von der Konzentration des dispergierten PCM ab.

eine Kompressionskältemaschine gekühlt wird. Das PCS mit einem Kapselanteil von 30 Gewichts-% wurde am Fraunhofer ISE charakterisiert und auf Stabilität getestet. Es erreicht eine Wärmekapazität von 60 kJ/kg bei einem Schmelzbereich von 22–28 °C. Die Viskosität verändert sich zwischen der flüssigen und der festen Phase des Paraffins von 30 auf 80 mPa s und die Dichte erhöht sich von 940 auf 980 kg/m³. Im Labor konnte eine Stabilität über 100 000 Zyklen nachgewiesen werden. Die installierte Anlage wird detailliert vermessen, um Aufschluss über das Verhalten im realen Betrieb und Hinweise auf Optimierungspotenziale zu erhalten.

Insbesondere Kälteanwendungen, die mit einer geringen Temperaturspreizung arbeiten müssen, könnten durch diese Technologie mit kompakteren Speichern ausgestattet und effizienter betrieben werden.

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



ADSORPTION VON ALKOHOLEN AN AKTIVKOHLEN FÜR THERMISCHE WÄRMEPUMPEN

Neben der Adsorption von Wasser bietet auch die Verwendung alternativer Kältemittel, z. B. Methanol oder Ethanol, eine interessante Möglichkeit, thermische Wärmepumpen zu betreiben. Der Vorteil liegt vor allem in der Nutzung von Quelltemperaturen unter 0 °C. Als Adsorbens können hierbei Aktivkohlen verwendet werden, die wir in unseren Labors z. B. aus Walnusschalen oder Traubenkernen herstellen.

Max Baumgartner, **Stefan Henninger**, Gunther Munz, Peter Schossig, Hans-Martin Henning

In marktverfügbaren Adsorptionskältemaschinen und -wärmepumpen wird als Arbeitsmittel in der Regel Wasser eingesetzt. Wasser hat den Vorteil, dass es eine sehr hohe Verdampfungsenthalpie besitzt und gleichzeitig ungiftig ist. Ein Nachteil ist jedoch der im Vergleich zu organischen Kältemitteln hohe Gefrierpunkt sowie der geringe Dampfdruck bei niedrigen Temperaturen. Damit wird der Einsatz als Kältemaschine, aber auch als Wärmepumpe niedertemperaturseitig auf Temperaturen oberhalb 0 °C eingeschränkt. Insbesondere beim Einsatz als Wärmepumpe ist der Temperaturbereich unter 0 °C aber sehr interessant, da sich z. B. bei Verwendung von Luft als Niedertemperaturwärmequelle der apparative Aufwand und somit die Investitionskosten deutlich reduzieren. Daher werden am Fraunhofer ISE auch die Arbeitsmittel Methanol und Ethanol für den Einsatz in Adsorptionssystemen untersucht.

Adsorptionsmaterialien aus Aktivkohle, die sich prinzipiell auch aus preisgünstigen Roh- und Reststoffen auf Basis von Biomasse mittels einfacher und bekannter Prozesstechnik herstellen lassen, zeigten dabei ein großes Potenzial. Mit Materialien, die wir in unserem Labor synthetisiert haben, konnten wir eine im Vergleich zu herkömmlichen Arbeits-

- 1 *Aus Biomasse hergestellte Aktivkohlen.*
- 2 *Ausgangsmaterialien für die Aktivkohleherstellung.*

paaren wie Wasser/Silikagel und Wasser/Zeolith eine sehr hohe Kältemittelaufnahme von 0,249 g pro Gramm Aktivkohle erreichen (Betriebsbedingungen: Antriebstemperatur 120 °C, Mitteltemperatur 29 °C und Verdampfertemperatur -5 °C). Die im Vergleich zu Wasser höheren Dampfdrücke der alkoholischen Kältemittel begünstigen zusätzlich die Adsorptionsgeschwindigkeit, da die Stofftransportprozesse wie Strömung und Diffusion bei höheren Druckgradienten deutlich schneller ablaufen. Da die Leistung einer Adsorptionskältemaschine in erster Näherung proportional zur Kältemittelaufnahme, zur Verdampfungsenthalpie und zur Adsorptionsgeschwindigkeit ist, erwarten wir, dass sich mit dieser Stoffkombination kompakte Geräte mit hoher Leistungsdichte realisieren lassen. Für eine technische Umsetzung ist eine hohe Stabilität der eingesetzten Materialien eine zentrale Anforderung. Erste Untersuchungen zu möglichen Zersetzungsreaktionen sowie der Langzeitstabilität des organischen Kältemittels zeigen vielversprechende Ergebnisse, diese Arbeiten werden an aussichtsreichen Materialkombinationen weitergeführt.

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



NEUARTIGE SORPTIONSMATERIALIEN UND BESCHICHTUNGEN

Thermisch angetriebene Kältemaschinen und Wärmepumpen stellen eine attraktive Möglichkeit zur energieeffizienten und kostengünstigen Raumkühlung bzw. -heizung dar. Neben der Entwicklung von neuartigen Sorptionsmaterialien, z. B. metall-organischen Gerüstverbindungen (Metal Organic Frameworks MOF) für diese Anwendungen, stellt die Anbindung dieser Funktionsmaterialien an Wärmeübertrageroberflächen ein weiteres wichtiges Arbeitsgebiet dar. Am Fraunhofer ISE konnten sowohl sehr vielversprechende neuartige Materialien als auch Beschichtungsverfahren zur Fixierung dieser Materialien auf Wärmeübertragerstrukturen entwickelt werden.

Stefan Henninger, Felix Jeremias, Harry Kummer, Peter Schossig, Hans-Martin Henning

In den vergangenen Jahren haben wir verstärkt neue Materialien mit dem Ziel einer möglichst hohen Adsorptionskapazität evaluiert und synthetisiert. Die Verwendung von metall-organischen Gerüstverbindungen (MOF) ist hier die neueste Entwicklung. Im Vergleich zu bisher untersuchten Materialien konnten deutlich höhere Beladungsumsätze erreicht werden. Hierbei konnte eine Verbindung identifiziert werden, die eine Maximalbeladung von 1,43 kg/kg zeigt und damit mehr als das 1,4fache des Eigengewichts an Wasser aufnehmen kann. Gleichzeitig zeigen einige Verbindungen einen sogenannten »Breathing Effect«, d. h. die Materialien können wie die menschliche Lunge das innere Volumen erhöhen und somit ab einem gewissen Druckpunkt nochmals deutlich mehr Wasser aufnehmen.

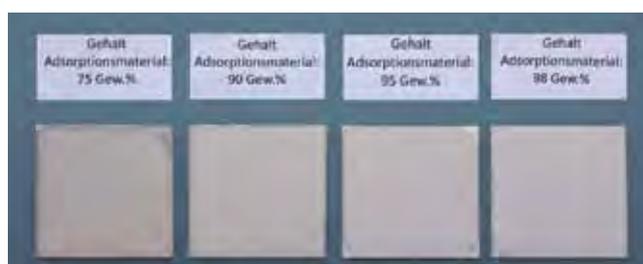
Neben der Wasserdampfaufnahme spielt der Wärme- und Stofftransport eine entscheidende Rolle für die erreichbare Leistungsdichte der Anlagen. Daher widmen wir uns auch intensiv der Beschichtung von Trägerstrukturen, um eine hohe

1 Beschichtungen von Trägerstrukturen mit unterschiedlichen Sorptionsmaterialien.

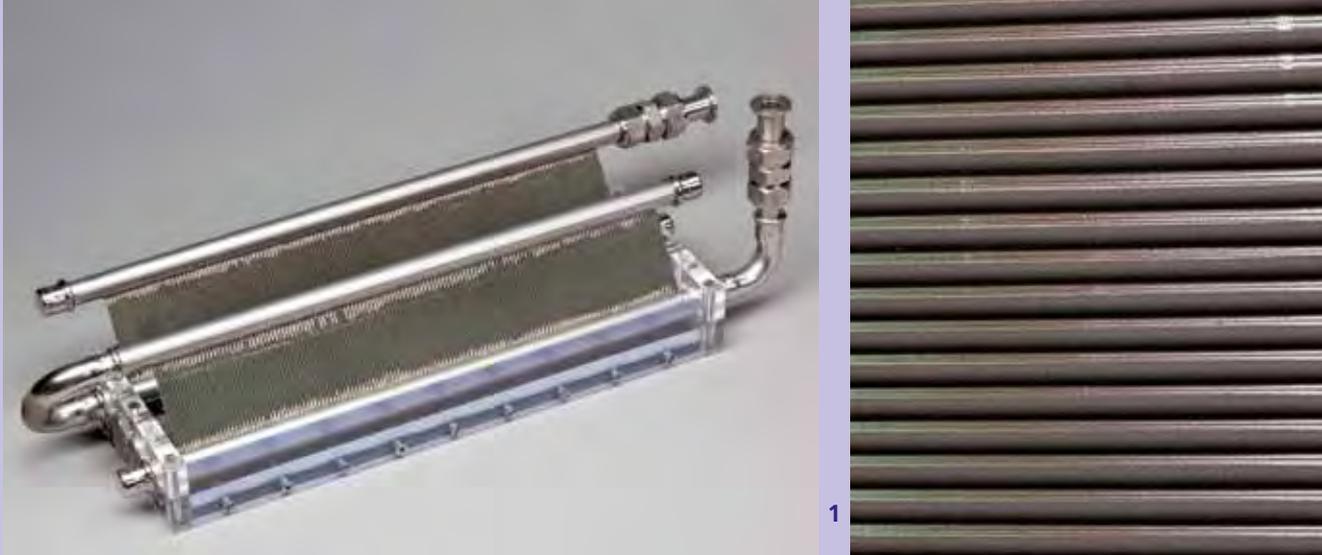
2 Neuartiges Sorptionsmaterial aus der Klasse der metall-organischen Gerüstmaterialien.

thermische Ankopplung an die Wärmeübertrager bei dennoch guter Zugänglichkeit der Adsorptionszentren zu erreichen. Hier ist es uns gelungen, verschiedene Sorptionsmaterialien, z. B. Zeolithe oder zeolithartige Materialien, aber auch neuartige metall-organische Gerüstverbindungen stabil und dauerhaft auf unterschiedliche Trägerstrukturen und mit unterschiedlichen Binderanteilen aufzubringen. Insbesondere an die thermische und damit auch mechanische Stabilität der Schicht werden hohe Anforderungen gestellt. So muss die Schicht mehrere tausend Zyklen zwischen hohen (140 °C) und niedrigen Temperaturen (30 °C) ohne Schädigung überstehen. Die ersten Einsatzversuche dieser Verbundmaterialien im Labormaßstab waren sehr vielversprechend.

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



3 Am Fraunhofer ISE realisierte Beschichtungen mit unterschiedlichem Binderanteil. Hier zeigt sich die hohe Flexibilität des von uns entwickelten Systems mit einer stabilen Schicht, selbst bei einem Binderanteil von nur 2 % (Binderanteil : 25 %, 10 %, 5 %, 2 % v.l.n.r.).



VERDAMPFERENTWICKLUNG FÜR ADSORPTIONSKÄLTEMASCHINEN

Die Entwicklung thermisch angetriebener Adsorptionskältemaschinen ist seit vielen Jahren ein Entwicklungsschwerpunkt am Fraunhofer ISE. Zielsetzung ist die Umsetzung höherer Leistungsdichten bei hoher energetischer Effizienz und Langzeitstabilität. Dazu ist einerseits ein auf die jeweilige Anwendung angepasstes Materialdesign, aber auch die Realisierung von effizienten Wärmeübertragerstrukturen erforderlich. Eine entscheidende Komponente, die ein großes Potenzial zur Erhöhung der Leistungsdichte insgesamt bietet, ist ein neu entwickelter Verdampfer, der im Projekt »SORCOOL« für das Kältemittel Wasser adressiert wurde.

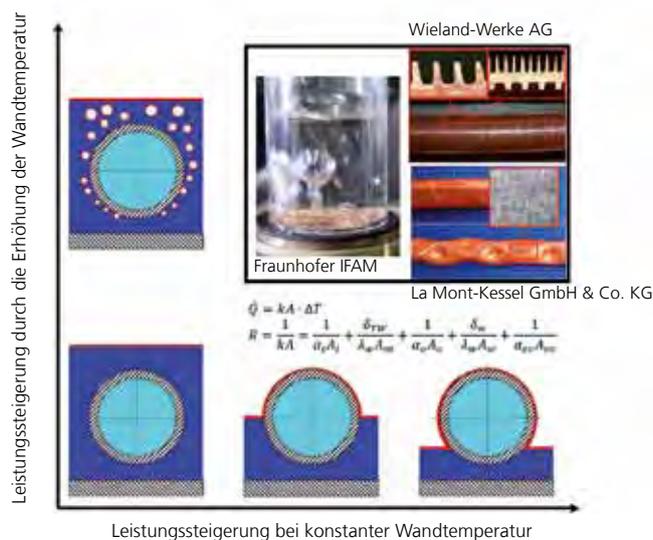
Lena Schnabel, Peter Schossig, Kai Thomas Witte, Hans-Martin Henning

1 Einbau von zwei Gewebe-Kapillarverdampferstrukturen am Messstand. Die von der Firma Spörl gefertigten Strukturen werden flächig durchströmt. Die Verdampfung findet aus der Gewebestruktur heraus statt, die das Kältemittel durch Kapillarkräfte aus dem Pool anzieht.

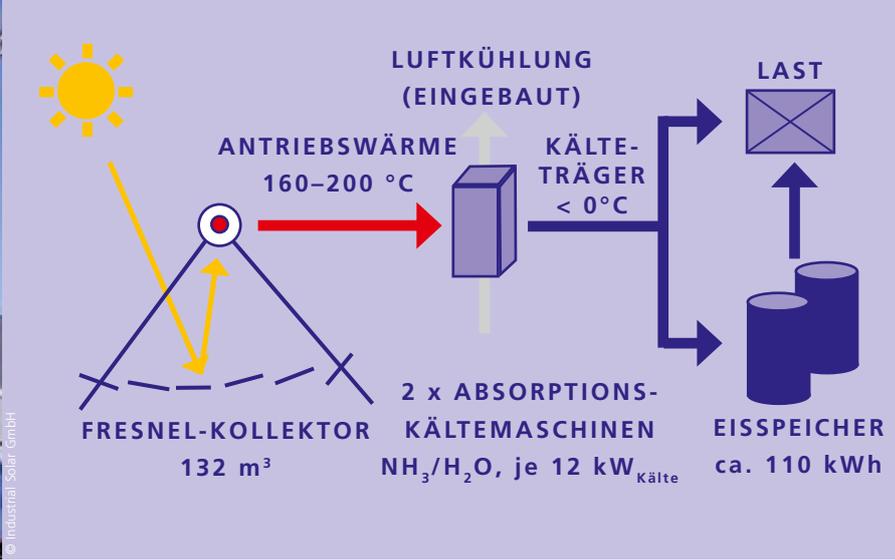
Wird Wasser als Kältemittel verwendet, so findet die Verdampfung bei geringen Temperaturen und Drücken (kleiner 25 mbar) statt. Als Wärmeübertrager werden grundsätzlich die klassischen Bauformen wie Lamellenwärmeübertrager oder Rohrbündel angewendet. Zur Minimierung der Druckverluste wird in ein freies Volumen verdampft. Am Fraunhofer ISE haben wir genauer untersucht, welche Übertragungsleistungen bei verschiedenen Siederegimen (konvektiv, Blasensieden) für kleine treibende Temperaturdifferenzen realisierbar sind.

Im Projekt »SORCOOL« konnte kapillar unterstützte Verdampfung als ein geeigneter und apparativ sehr einfacher Betriebsmodus identifiziert werden, der sich bereits mit marktverfügbaren Strukturen gut realisieren lässt. Durch die Nutzung von Rohren mit Mikro- und Makrostrukturbereichen (Abb. 1) wurden um bis zu 14fach höhere Verdampfungsleistungen im Vergleich zu glatten Referenzrohren erreicht. Entscheidend ist die Erzeugung dünner Wasserfilme durch Berieselung oder kapillare Verteilstrukturen. Auch Blasensieden ist mit geeigneten Strukturen erreichbar. Zur Erhöhung der Gesamteffizienz sind neben der Steigerung des Wärmeübergangs auf der Verdampfungsseite auch der Wärmeübergang an das Transportfluid und die Reduzierung der Druckverluste zu berücksichtigen. Als Lösungsansatz werden derzeit die in Abb. 1 gezeigten Strukturen untersucht. Derartige Konzepte versprechen deutlich reduzierte Bauvolumina bei gleichzeitig geringeren treibenden Temperaturdifferenzen und Druckverlusten.

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



2 Verbesserungstechniken zur Steigerung der Wärmeübertragung auf der Außenseite eines eingetauchten Verdampferrohrs. Bildausschnitt: Regime des Blasensiedens bei Verwendung einer 3D-metallischen Kurzfaserstruktur, die am Fraunhofer IFAM hergestellt wurde (links), und Hochleistungsverdampferrohre (rechts).



SOLARE KÜHLUNG MIT KONZENTRIERENDEN KOLLEKTOREN

In der solarthermisch angetriebenen Kühlung besteht insbesondere noch Entwicklungsbedarf für Systeme im kleinen und mittleren Leistungsbereich. Die Weiterentwicklung der vielseitigen Technik in diesem Leistungsbereich und das Aufzeigen markttauglicher Lösungen war Aufgabe des EU-Projekts »SOLERA«. Kernstück des vierjährigen Projekts waren Planung, Aufbau, Betrieb und die Evaluierung von drei Versuchsanlagen in Deutschland, Frankreich und Italien. In Freiburg wurde die Kombination eines konzentrierenden Fresnel-Kollektors mit thermisch angetriebenen Kältemaschinen getestet. Mit dieser Technik lassen sich neue Anwendungsbereiche, z. B. für industrielle Prozesse oder die Lebensmittelkühlung, erschließen.

Alexander Morgenstern, **Christine Weber**, Edo Wiemken, Hans-Martin Henning

Im Projekt »SOLERA« waren unter Leitung des Fraunhofer ISE zwölf Partner aus Forschung und Industrie beteiligt. Neben markt- und planungsunterstützenden Aktivitäten zur solaren Kühlung umfasste das Projekt den Aufbau und die messtechnische Begleitung von drei Anlagen mit Nutzung unterschiedlicher Kollektor- und Kältetechniken. Eine der Anlagen wurde in der Nähe von Freiburg installiert. Das Besondere an dieser Anlage ist die Kombination eines linear konzentrierenden Fresnel-Kollektors (Aperturfläche 132 m²) mit zwei thermisch angetriebenen Kältemaschinen, die Ammoniak als Kältemittel und Wasser als Sorptionsmittel nutzen (Nennkälteleistung jeweils 12 kW). Mit den einachsigen nachgeführten Kollektoren können Temperaturen bis 400 °C erreicht werden, diese eignen sich somit sehr gut für den Einsatz in industriellen Prozessen. Im Demonstrationsprojekt erzeugen die mit 160–200 °C angetriebenen Kältemaschinen Kälteflüssigkeitstemperaturen unter 0 °C, um vier Eisspeicher (je 300 Liter; Speicherkapazität gesamt ca. 110 kWh) aufzuladen. Somit kann

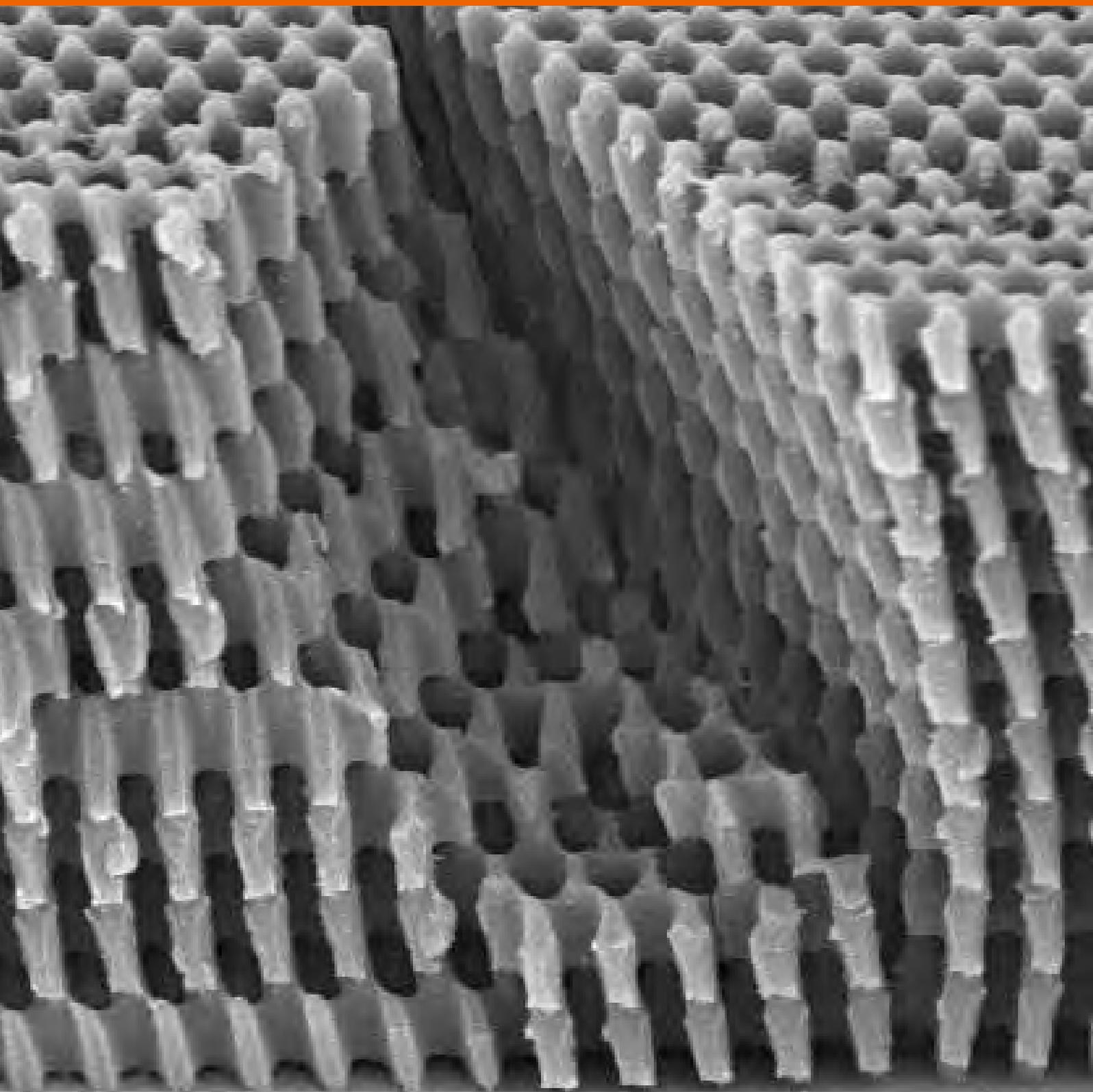
- 1 Linear konzentrierender Fresnel-Kollektor der Industrial Solar GmbH, Deutschland. Der Kollektor stellt Wärme für Prozesswärmanwendungen bei Temperaturen bis 400 °C bereit.
- 2 Der Fresnel-Kollektor dient als Wärmequelle zum Antrieb der beiden Absorptionskältemaschinen. Mit Antriebstemperaturen bis zu 200 °C kann der Kälteflüssigkeit auf -12 °C gekühlt werden. Damit lässt sich direkt der Kälteabnehmer versorgen und/oder der Eisspeicher beladen, über den auch bei nachlassender Einstrahlung Kälte bereitgestellt werden kann (Hersteller der Kältemaschinen mit dem Stoffpaar Ammoniak-Wasser: Robur, Italien).

Kälte auch dann bereitgestellt werden, wenn keine Solarstrahlung vorhanden ist. Dadurch werden die Betriebsstundenzahl und die Effizienz der installierten Anlage gesteigert. Das hydraulische Konzept erlaubt es, die beiden Kältemaschinen je nach Kältebedarf und Strahlungsangebot seriell oder parallel zu betreiben.

Der Betrieb der Versuchsanlage hat gezeigt, dass die verwendeten Anlagenkomponenten technisch ausgereift sind und zuverlässig arbeiten. An einem sonnigen Betriebstag im August erreichte der Kollektor z. B. eine Spitzenleistung von über 60 kW, wovon rund 42 kW als Antriebsleistung für die Kältemaschinen genutzt wurden und eine Kälteleistung von 24 kW erzielt wurde. Durch die Erzeugung von Kaltwassertemperaturen unter 0 °C ist insbesondere eine Anwendung für die Lebensmittelkühlung in südlichen Regionen von Interesse. Die planerische und betriebstechnische Zusammenführung der Anlagenkomponenten zu einem Gesamtsystem stellt allerdings noch eine Herausforderung dar und wird weitere Arbeiten erfordern hin zu einer Standardisierung, um eine erfolgreiche Breitenanwendung an sonnenreichen Standorten zu erlauben.

Das Projekt wurde durch die Europäische Kommission gefördert.

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.

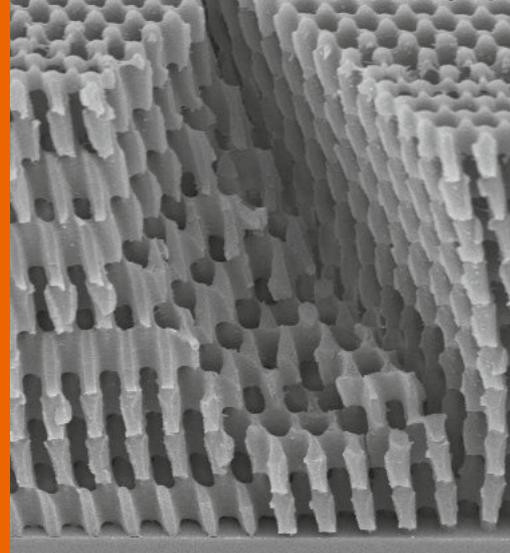
Die effektive Regelung des solaren Licht- und Energiestroms in der Fassade ist bei großflächig verglasten und energieeffizienten Gebäuden sehr wichtig. Schaltbare Beschichtungen auf Fensterscheiben erlauben es, die Transmission der Fenster über eine große Bandbreite zu verändern. Als nicht-mechanische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

Durchsicht und Anfälligkeit gegenüber Wind. Beschichtungen zur Minderung der Reflexionen oder der Schmutzanlagerung erhöhen die Transmission.

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. Andere transparent leitende Schichten werden für die elektrischen Kontakte von Dünnschicht-Photovoltaik und organischen Solarzellen benötigt.

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, Auger-Elektronenspektroskopie

REM-Aufnahme eines dreidimensionalen photonischen Kristalls in Photoresist, der durch Interferenzlithographie mit vier überlagerten Wellen hergestellt wurde. Photonische Kristalle können durch ihre winkel- und spektralselektiven Eigenschaften zu einer effizienteren Lichtausnutzung in Solarzellen beitragen.

ANSPRECHPARTNER

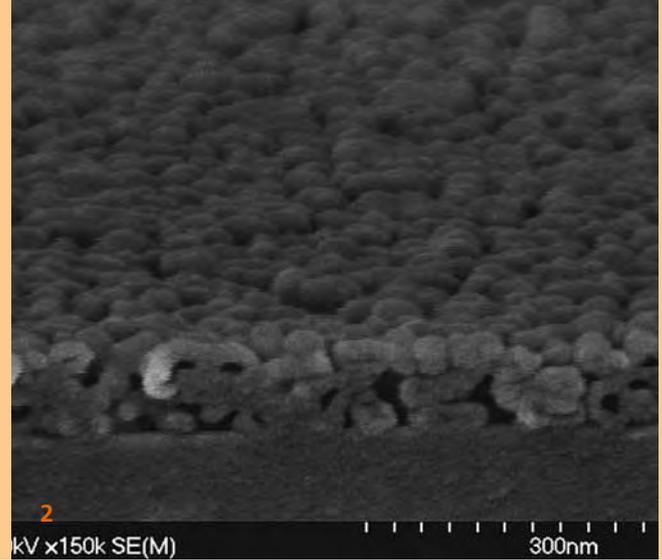
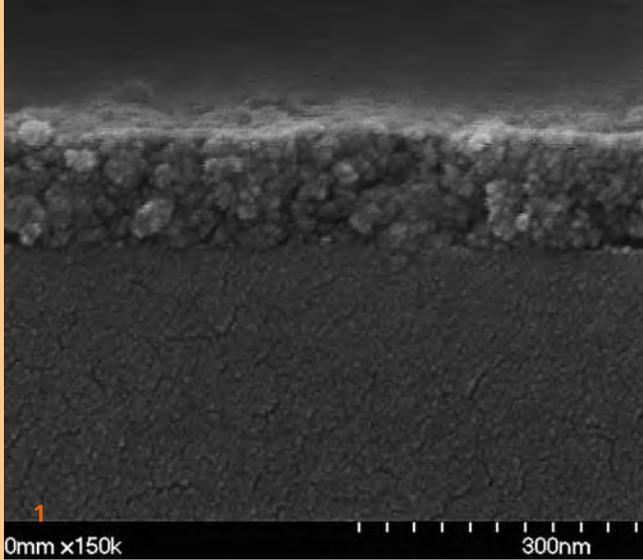
Beschichtungen – Technologien und Systeme Dipl.-Phys. Wolfgang Graf Telefon +49 761 4588-5946
wolfgang.graf@ise.fraunhofer.de

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

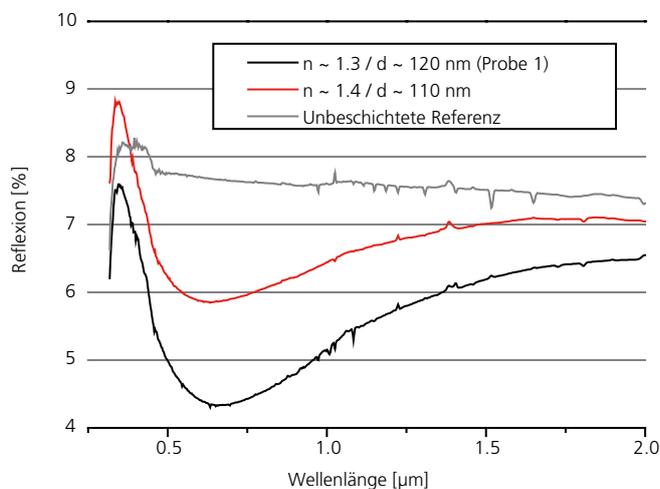
Lichttechnik Dr.-Ing. Jan Wienold Telefon +49 761 4588-5133
jan.wienold@ise.fraunhofer.de

Konzentratoroptik Dr. Peter Nitz Telefon +49 761 4588-5410
peter.nitz@ise.fraunhofer.de



CHARAKTERISIERUNG NANOPORÖSER ANTIREFLEXSCHICHTEN

1–3 Rasterelektronenmikroskopische (REM) Aufnahmen von nanoporösen Antireflexschichten. Alle drei Schichten weisen eine vergleichbare Gesamtporosität, daher einen ähnlichen effektiven Brechungsindex ($n \approx 1,3$) und ein ähnliches Reflexionsverhalten auf. Die Porengrößen nehmen von Probe 1 (Abb. 1) nach Probe 3 (Abb. 3) zu. Die Poren der Probe 3 sind so groß, dass diese Schicht für kurzwellige Strahlung optisch nicht mehr homogen ist und daher leicht streut.



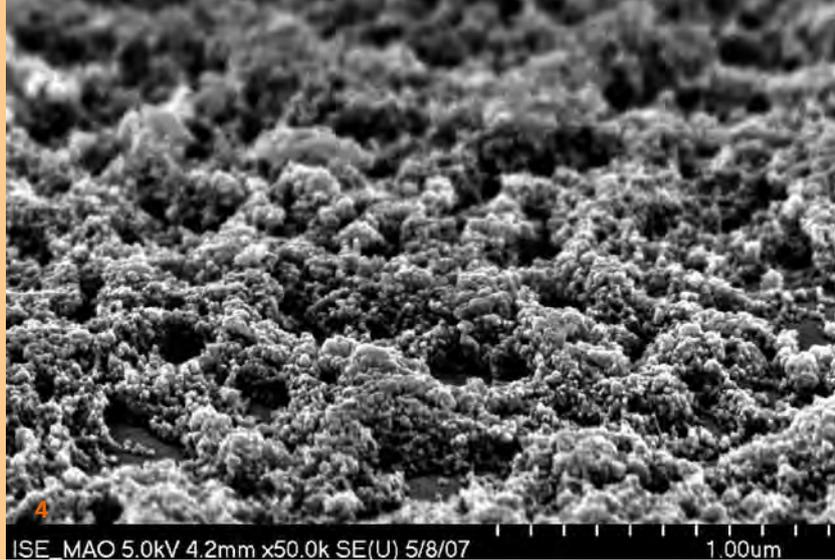
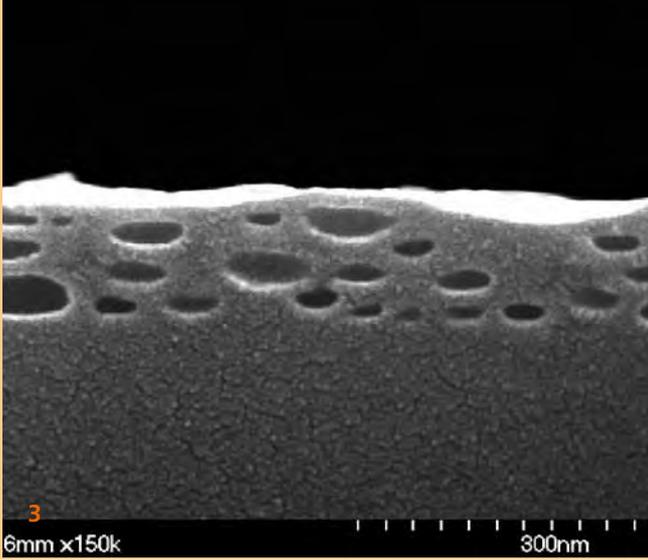
5 Spektrale Reflexionen von einseitig beschichteten Gläsern. Eine AR-Schicht mit hoher Porosität (z. B. Probe 1, schwarz, Abb.1) zeigt eine deutlich bessere AR-Wirkung als eine Schicht mit geringerer Porosität, die zu einem höheren Brechungsindex führt (rot). Zum Vergleich ist die Reflexion einer unbeschichteten Glasreferenz (blau) eingezeichnet.

Eine Entspiegelung der Glasoberflächen von PV-Modulen oder solarthermischen Kollektoren führt zu einer deutlichen Erhöhung der optischen Effizienz. Gleichzeitig ermöglicht eine größere Transmission bei Gebäudeverglasungen einen höheren solaren Energieeintrag, wodurch Heizungsenergie eingespart wird. Zur breitbandigen Entspiegelung von Glasoberflächen sind stabile Materialien mit geringem Brechungsindex notwendig. Diese Anforderungen werden mit nanoporösen Antireflexschichten auf SiO_2 -Basis erfüllt. Für die Beurteilung der Funktionalität, Qualität und Beständigkeit solcher Schichten setzen wir hochpräzise und umfassende Analysemethoden ein.

Benedikt Bläsi, Walther Glaubitt*, Volker Kübler, Angelika Schmitt*, **Andreas J. Wolf**, Werner Platzer

* Fraunhofer ISC

Eine breitbandige Entspiegelung von Glas kann durch sogenannte $\lambda/4$ -Schichten oder durch Brechungsindex-Gradientenschichten realisiert werden (Abb. 5). In beiden Fällen werden Materialien mit sehr geringem Brechungsindex ($n < 1,35$) benötigt. Der Schlüssel zur Einstellung des Brechungsindex liegt in den sogenannten »effektiven Medien«: Dies sind Materialkompositionen, deren Einzelstrukturgrößen deutlich kleiner als die Lichtwellenlänge sind. Die optischen Eigenschaften der beteiligten Materialien ergeben dann einen homogenen effektiven Brechungsindex. Mit nanoporösen Schichten

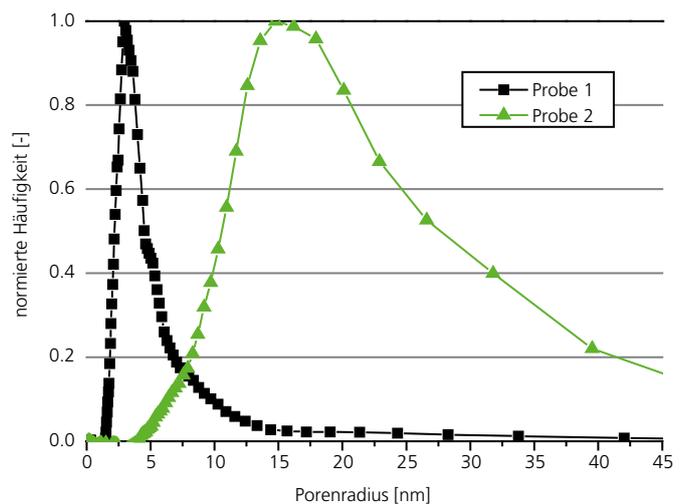


auf SiO_2 -Basis sind Indizes im relevanten Bereich erzielbar. Zusammen mit dem Brechungsindex wird die Antireflexwirkung durch die Schichtdicke bestimmt. Für $\lambda/4$ -Schichten liegt deren Optimum im Bereich 110–150 nm.

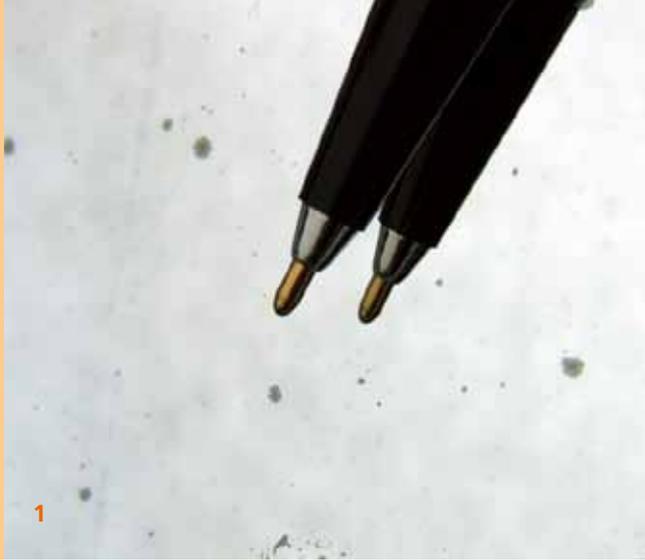
Die in den Abb. 1–4 gezeigten Schichten sind für Außenanwendungen entwickelt worden und somit dem Klima exponiert. Die Ad- und Desorption von Feuchtigkeit bei variierender Luftfeuchte hängt direkt von der Größe der Poren ab. Dadurch verändert sich der effektive Brechungsindex und damit das Reflexionsverhalten der Schichten. Diesen Effekt nutzt die ellipsometrische Porosimetrie. Mit dieser Methode können wir die Verteilung der Porengeometrien bestimmen (Abb. 6), die wesentlichen Einfluss auf die Beständigkeit der Schichten hat. Mit Hilfe von optischen Simulationswerkzeugen können wir sowohl Schichtsysteme designen als auch Messdaten modellieren. So können wir die Konsistenz der Messergebnisse und der daraus abgeleiteten Schichteigenschaften durch theoretische Daten bestätigen.

Die Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) sowie der CentrosolarGlas AG und der Merck KGaA gefördert.

4 Beispiel einer inhomogenen Antireflexschicht. Die Agglomerationen von porösem Material führen zu einer überlagerten Mikrostruktur, die Streuung verursacht.



6 Porenradienverteilung von Probe 1 (schwarz, Abb. 1) und Probe 2 (grün, Abb. 2), berechnet aus der Adsorptionskurve der ellipsometrischen Porosimetrie.



TEMPERATURKORROSION AN SPIEGELSCHICHTEN FÜR SEKUNDÄRSPIEGEL

Sekundärspiegel in solarthermischen Kraftwerken fokussieren bereits durch Primärspiegel gebündeltes Sonnenlicht nach. Aufgrund seiner hohen Reflexion wird hierbei Silber als spiegelndes Material eingesetzt. Durch die starken Lichtintensitäten erreichen die Sekundärspiegel hohe Temperaturen, die eine Korrosion bewirken, deren Mechanismus im Folgenden dargestellt wird. Hieraus lassen sich Maßnahmen zur Unterdrückung der Korrosion ableiten.

Kilian Dallmer-Zerbe, **Andreas Georg**, Wolfgang Graf, Elisabeth Klimm, Marius Kühne, Werner Platzer

Bei Fresnel-Kollektoren, einem speziellen Typus solarthermischer Kraftwerke, werden Sekundärspiegel zur Nachfokussierung des Sonnenlichts eingesetzt. Dabei können diese Spiegel Temperaturen bis zu 300 °C erreichen. Dies stellt eine Herausforderung an die Spiegelschichten dar. Am Fraunhofer ISE wird hierzu eine Silberschicht in ein Mehrschichtsystem zusammen mit Barriere- und Haftschichten auf Glas durch ein Sputterverfahren abgeschieden (Abb. 5).

Silber ist zwar ein Edelmetall, kann aber dennoch degradieren. Die bekannteste Form ist das »Anlaufen« durch Reaktion mit H₂S aus der Atmosphäre. Dies konnte durch geeignete Barrierschichten zur Luftseite unterdrückt werden.

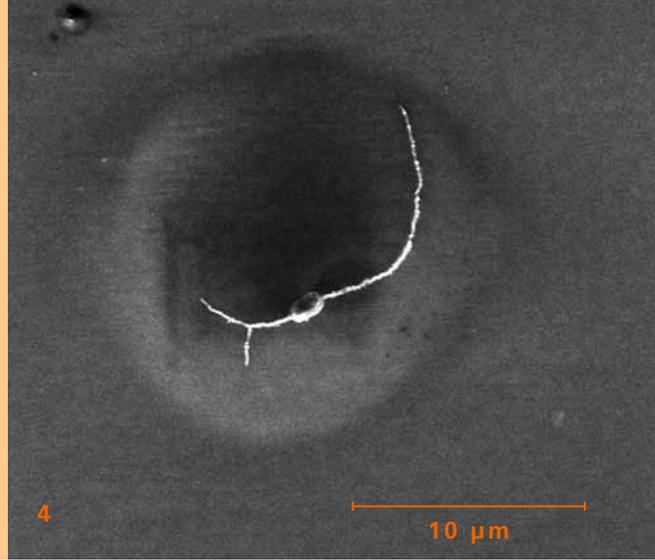
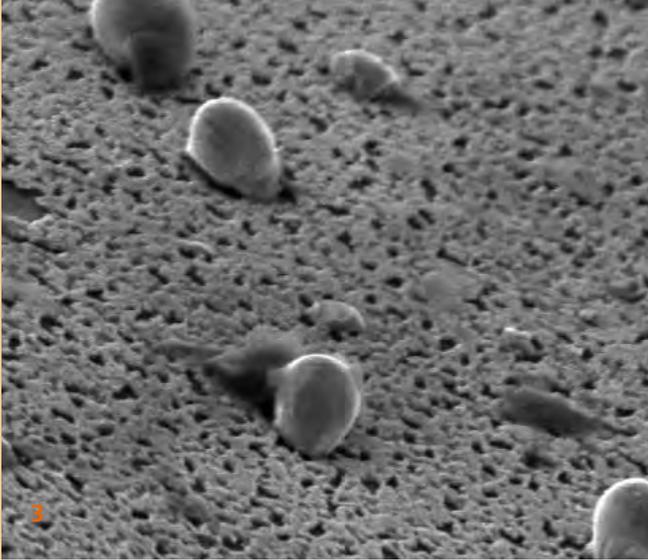
Zusätzlich ist eine Barrierschicht zum Substrat erforderlich, um die Diffusion von Ionen aus dem Glas zu unterbinden.

Ein weiterer Degradationsmechanismus ist die Lochkorrosion, die unterschiedliche Formen annehmen kann. Beobachtet werden vor allem zwei Typen: die Bildung weniger, großer Defekte, und die Bildung vieler, kleiner Störstellen (Abb. 1/2). Wesentlich für den Mechanismus dieser Korrosion ist die Neigung von Silberschichten zur Agglomeration. Abb. 3 zeigt eine rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer agglomerierten Silberschicht ohne Deckschicht nach einer Stunde bei 450 °C.

Durch Beschichten der Silberschicht mit einer Deckschicht kann diese Agglomeration unterdrückt werden. An lokalen Erhebungen, z. B. Staubpartikeln, ist diese Schutzfunktion jedoch gestört und führt zu großen Defekten. Silber quillt unter der Deckschicht hervor, die Grenzflächenenergie zwischen Silber und Deckschicht sinkt und der Defekt wächst. Dieser Prozess kann durch Erhöhung der Grenzflächenenergie zwischen Silber und Deckschicht durch geeignete Zwischenschichten reduziert werden. Die kleinen Defekte werden vermutlich durch thermische Spannungen hervorgerufen, die ein Aufwölben der Silberschicht und dann ein Abplatzen bewirken (Abb. 4).



5 *Prinzipieller Schichtaufbau einer Spiegelschicht eines Oberflächenspiegels mit hoher Temperaturbeständigkeit.*



Thermische Spannungen in Einzelschichten wurden durch Verkrümmung dünner Substrate vermessen. Mittels Variation des Substratmaterials konnte eine Abschätzung des Elastizitätsmoduls und des thermischen Ausdehnungskoeffizienten der sehr dünnen Schichten (Schichtdicke um 100 nm) gewonnen werden.

Für dielektrische Schichten, wie sie als Barrierschichten eingesetzt werden, erhält man erwartungsgemäß geringe Ausdehnungskoeffizienten, wenn diese auch von den jeweiligen Werten des Grundmaterials abweichen. Silber weist hier einen hohen Ausdehnungskoeffizienten auf und ist somit kritisch für Glassubstrate mit geringem Ausdehnungskoeffizienten. Es gelang jedoch, den Abscheideprozess zu modifizieren und den Ausdehnungskoeffizienten auf ein Drittel zu senken.

Intrinsische Spannungen, wie sie durch den Abscheideprozess entstehen, können die Degradation ebenfalls verschärfen. Dies konnte durch eine Auswahl der Materialien und Modifikationen in der Prozessführung reduziert werden.

Insgesamt konnte eine Stabilität der Spiegelschichten bei 250 °C erzielt werden. Für eine Temperatur von 350 °C ergab sich ein Abfall von 7 % in der solaren Reflexion über fünf Monate bei einer Schichtmodifikation, die den Korrosionstyp der kleinen Defekte zeigt. Für eine Modifikation des Typs mit großen Defekten ergab sich dagegen ein Abfall von nur 1,5 %.

Weitere Ansätze zur Verbesserung der Stabilität werden derzeit untersucht. Die Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.

- 1 Lochkorrosion an Spiegelschichten nach Ausheizen bei 350 °C für 3800 h mit wenigen großen Defekten.
- 2 Lochkorrosion an Spiegelschichten nach Ausheizen bei 350 °C für 3800 h mit vielen kleinen Defekten.
- 3 REM-Aufnahme einer Silberschicht ohne Deckschichten nach Ausheizen für eine Stunde bei 450 °C.
- 4 Kleiner Punktdefekt im Rasterelektronenmikroskop.

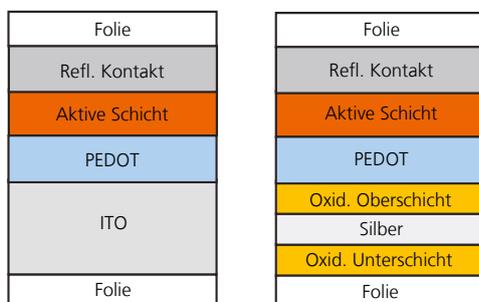


ITO-FREIE TRANSPARENTE ELEKTRODEN FÜR ORGANISCHE SOLARZELLEN

Die Verwendung von transparenten Elektroden basierend auf Indium-Zinn-Oxid (ITO) stellt einen wesentlichen Kostenfaktor für organische Solarzellen dar. Im Folgenden wird eine alternative silberbasierte Elektrode vorgestellt, die sich gut aufskalieren lässt und neben Kostenvorteilen auch bessere elektrische und mechanische Eigenschaften aufweist. Die sogenannte Silberelektrode besteht aus einer dünnen Silberschicht eingebettet in oxidische Schichten. Der Mehrschichtaufbau erlaubt eine besonders gute Anpassung an die Anforderungen des jeweiligen Bauelements. Darüber hinaus ist die Silberelektrode auf Folie wie auf Glas kostengünstig in großem Maßstab herstellbar.

Andreas Georg, Leonard Kraus, **Thomas Kroyer**, Hans-Frieder Schleiermacher, Uli Würfel, Birger Zimmermann, Werner Platzer

Als ITO-freie Elektrode wurde eine ca. 10 nm dünne Silberschicht verwendet, die in zwei oder mehr oxidische Schichten eingebettet ist (Abb. 1/2). Während die oxidische Unterschicht



2 Aufbau von organischen Solarzellen mit ITO als transparenter Elektrode (links) und mit einer transparenten Silberelektrode als preiswertem ITO-Ersatz (rechts). Durch Anpassen der Austrittsarbeit der oberen Oxidschicht kann die Silberelektrode als Elektronen- und auch als Lochkontakt eingesetzt werden.

1 Auf PET abgeschiedene transparente Silberelektrode. Auch auf Folie kann eine optische Transmission von 87 % im Spektralbereich der organischen Solarzellen bei einem Schichtwiderstand unter 10Ω erreicht werden. Wegen der nanokristallinen Schichtstruktur weisen die Silberelektroden eine sehr gute Elastizität auf und eignen sich besonders für flexible Anwendungen mit mehrfachen Biegezyklen.

vorwiegend als Haftvermittler zur Folie dient, gewährleistet das Silber die elektrische Leitung im Schichtsystem. Die schwierigsten Anforderungen bestehen an die oxidische Oberschicht. Sie muss zumindest begrenzt elektrisch leitfähig sein und bei Einsatz des sauren PEDOT:PSS die erforderliche chemische Stabilität aufweisen. Für die elektronische Ankopplung an die Energiebänder der Elektronen oder Löcher in der aktiven Schicht muss darüber hinaus die Austrittsarbeit passend eingestellt sein, was durch eine entsprechende Wahl der Oxide sowie deren Stöchiometrie gelang. Die optischen Eigenschaften der Silberelektrode wurden auf maximale Absorption in der aktiven Schicht der jeweiligen Solarzelle optimiert. Dies kann durch die Auswahl von Oxiden mit passender Brechzahl sowie durch die Optimierung der Oxiddicken erfolgen.

Wir konnten erfolgreich verschiedene Silberelektroden für die Verwendung als transparente Kathoden und Anoden von organischen Solarzellen herstellen. Dabei wurde der Wirkungsgrad der ITO-Referenzzelle jeweils mindestens erreicht. Vorläufige Ergebnisse deuten auf eine bessere Langzeitstabilität als mit ITO hin.

Für die zur Serienschaltung nötige Strukturierung der Elektrode haben wir ein lithographisches Verfahren sowie die Laserstrukturierung erfolgreich getestet. Die Silberelektrode kann auf industriellen Bandbeschichtungsanlagen produziert werden und als Halbzeug in den Rolle-zu-Rolle-Zellherstellungsprozess eingebunden werden.



FRESNELLENSEN MIT HOHER EFFIZIENZ TROTZ TEMPERATURVARIATION

In der Photovoltaik mit Flachmodulen wird das Sonnenlicht über großflächige Halbleiter eingesammelt und in elektrische Energie umgewandelt. Die konzentrierende Photovoltaik (CPV) senkt die Kosten, indem sie nur winzige Solarzellen verwendet und die große Fläche mit Optiken überdeckt, die das Licht darauf fokussieren. Die Witterung am Kraftwerksstandort beeinflusst die Temperatur der Optik und dadurch deren Leistungsfähigkeit. Mit Hilfe von Computersimulationen und präzisen Messungen ist es uns gelungen, Konzentratoren-Fresnellinsen zu entwickeln, die im relevanten Temperaturbereich deutlich geringere thermisch bedingte Verluste aufweisen als herkömmliche Fresnellinsen. Sie können dazu beitragen, die Effizienz eines CPV-Kraftwerks zu erhöhen und die Stromgestehungskosten zu senken.

Thorsten Hornung, Peter Nitz, Werner Platzler

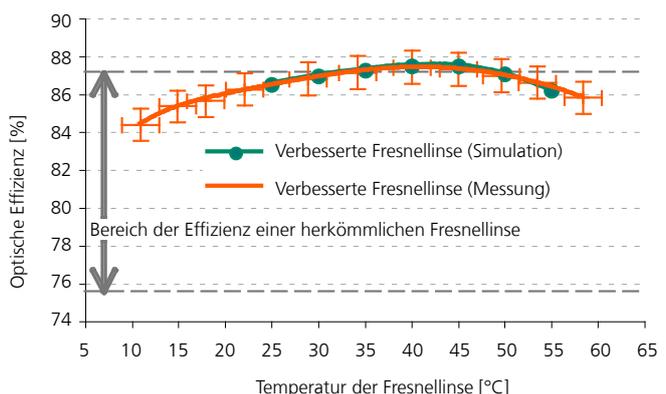
Die meisten CPV-Systeme setzen Fresnellinsen ein, um das direkte Sonnenlicht auf viele kleine Solarzellen zu fokussieren. Diffuses Sonnenlicht kann dabei nicht genutzt werden. Außerdem muss das System mechanisch der Sonne nachgeführt werden. Daher eignet sich diese hocheffiziente Technologie vorwiegend für Solarkraftwerke in Wüstenregionen. Die Optik ist dabei den stark variierenden Temperaturen am Kraftwerksstandort unterworfen.

2 Optische Effizienz der neu entwickelten Fresnellinse mit reduzierter Temperaturabhängigkeit. Die Voraussage der Effizienz durch die Simulation wird durch die Messung bestätigt. Messungen an einer herkömmlichen Fresnellinse zeigen im selben Temperaturbereich eine wesentlich größere Variation der optischen Effizienz. Ihre Effizienz ist bei fast allen Temperaturen geringer als die der neu entwickelten Fresnellinse (Messdaten: Soitec Solar und Fraunhofer ISE).

1 Glasplatte mit Fresnellinsen für die konzentrierende Photovoltaik.

In den letzten Jahren haben wir unsere spezialisierten Messplätze für Konzentratoroptiken verbessert und ausgebaut. Parallel dazu haben wir die Computersimulationen der Optik weiter verfeinert und verschiedene Temperatureffekte integriert. Unsere Messungen zeigen, dass die verwendeten Fresnellinsen nicht bei allen Temperaturen gleich gut funktionieren. In Kraftwerken gehen dadurch teilweise mehrere Prozent des einfallenden Lichts für die Stromerzeugung verloren. Mit Hilfe unserer Computermodelle entwickelten wir Fresnellinsen, die im relevanten Temperaturbereich zwischen 10 °C und 60 °C eine geringere Temperaturabhängigkeit aufweisen als herkömmliche Konzentratoren-Fresnellinsen (Abb.1). Messungen an Prototypen dieser Linsen folgen sehr genau dem Verlauf, den wir anhand unserer Computermodelle vorhergesagt haben.

Wir sind daher zuversichtlich, dass diese verbesserte Fresnellinse auch in realen Kraftwerken im Mittel deutlich mehr Licht auf die Solarzellen lenken wird, das dort in elektrische Energie umgewandelt werden kann. Auf diese Weise steigt der Wirkungsgrad des Systems und die Kosten des erzeugten Stroms sinken.



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 in Freilandanlagen. Die solar erzeugte Wärme kann entweder direkt genutzt, über Wärmekraftmaschinen in Strom oder mittels thermischer Kältemaschinen in Kälte umgewandelt werden. Generell sind die beiden entscheidenden Faktoren für die Leistungsfähigkeit der Systeme die Effizienz des optischen Strahlungstransports und die Minimierung der Wärmeverluste.

Das Geschäftsfeld »Solarthermie« umfasst den gesamten Markt von Nieder- bis Hochtemperaturanwendungen: Solarthermische Kollektoren und Kollektorsysteme auf der Basis von Flach- und Vakuumröhrenkollektoren unterschiedlicher Ausprägung 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 Fresnel-Kollektoren 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 Solarstrahlung in Wärme um. Dabei kann je nach Ausformung der solarthermischen Kollektoren eine Temperaturerhöhung über die Umgebungswärme von wenigen Grad bis hin zu mehreren hundert Grad erfolgen. Je geringer die thermischen Verluste eines Empfängers, je besser die optischen Wirkungsgrade und je höher die Konzentration der Strahlung, 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. Wir untersuchen dafür Alternativen zu Aluminium und Kupfer, z. B. Stahl, aber auch nicht-metallische Werkstoffe.

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 und Kälteerzeugung 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 flexibel sowohl für den Tagesspitzenbedarf als auch für Zeiten erhöhter Last 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 neben der Sonne auch andere Wärmeerzeuger einsetzen.



Damit lassen sich Laufzeiten rund um die Uhr realisieren. Die nichtsolare Wärmeerzeugung kann z. B. regenerativ über Biomasse geschehen. Über Hybridisierung oder über thermische Speicherung können die Kraftwerke sogar 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 andere 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 Solar-Luftkollektoren

Solarthermische Kraftwerke besitzen in Ländern mit hoher Direktstrahlung ein enormes Potenzial, Solarstrom flexibel sowohl für den Tagesspitzenbedarf als auch für Zeiten erhöhter Last kostengünstig zu erzeugen. Das Fraunhofer ISE befasst sich sowohl mit der Optimierung der optischen Oberflächen und Materialien als auch mit Fresnel-Konzepten und entsprechender Anpassung der Spiegel für das Kollektorfeld. Ein weiterer Schwerpunkt ist die Entwicklung neuartiger Latentspeicherkonzepte mit Phasenwechselmaterialien, zur Stromproduktion unabhängig vom aktuellen Strahlungsangebot.

ANSPRECHPARTNER

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

Energieeffiziente und solare Kühlung	Dr. Doreen Kalz	Telefon +49 761 4588-51403 doreen.kalz@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
---------------------------------	--------------------	---



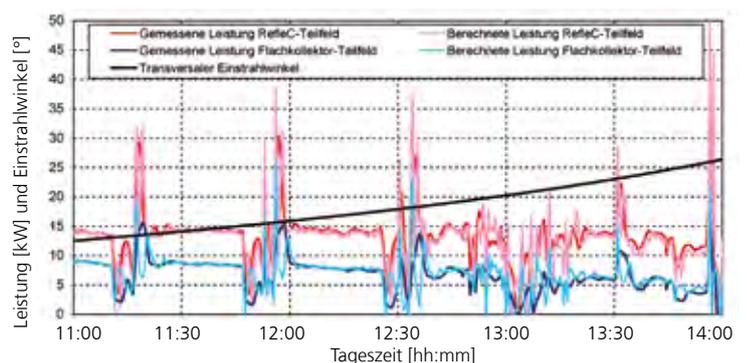
SOLARE PROZESSWÄRME: ANLAGEN-MONITORING UND PLANUNGSHILFEN

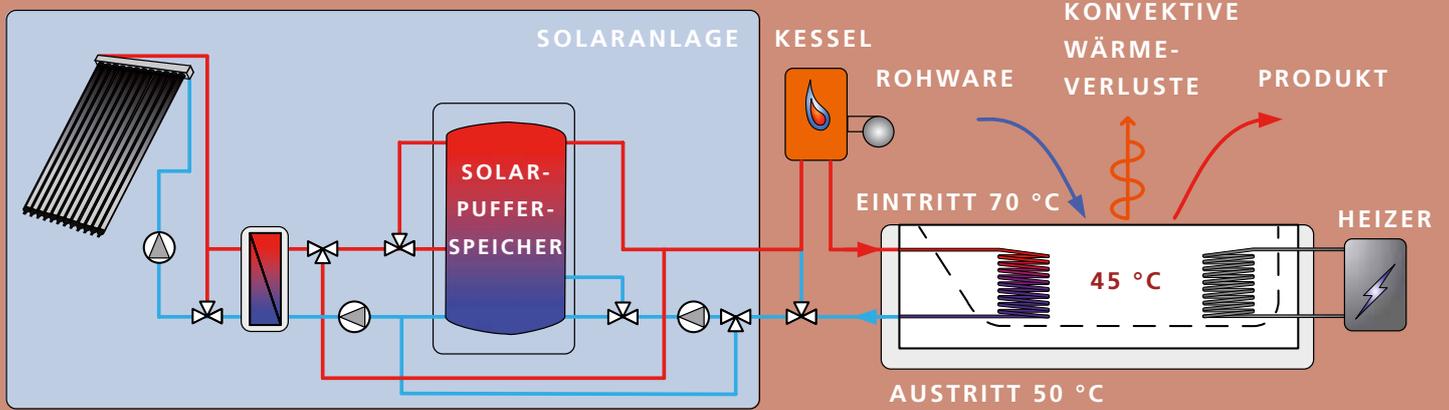
Industrielle Prozesswärme hat einen Anteil von ca. 44 % am Wärmebedarf der Europäischen Union (EU), verursacht also mehr als 20 % unseres gesamten Endenergiebedarfs. Thermische Solaranlagen haben das Potenzial, ca. 10 % des europäischen Prozesswärmebedarfs unter 250 °C bereitzustellen. Wir haben ein umfassendes Monitoring einer Pilotanlage zur solaren Unterstützung eines Wäscherei-Dampfnetzes durchgeführt und konnten dadurch die Ertragssimulationen für einen von uns entwickelten Prozesswärme-Flachkollektor validieren. In einem EU-Projekt haben wir vier industrielle Prozesse mit hohem Potenzial identifiziert und für diese Anwendungen Systemkonzepte und Auslegungs-Nomogramme erarbeitet.

Michael Hermann, **Stefan Heß**, Paolo Di Lauro, Axel Oliva, Gerhard Stryi-Hipp, Werner Platzer

- 1 Kollektorfeld der Wäscherei Laguna in Marburg, Lahn. Die RefleC-Kollektorreihe (2 Teilfelder) besitzt eine Glas-Folien-Zweifachabdeckung und einen externen Reflektor. Dieser stützt eine vorgelagerte, ebenfalls doppelt abgedeckte Referenz-Kollektorreihe (Glas-Folien-Kollektor ohne Reflektor, 1. Teilfeld).
- 2 Speicherkaskade der Pilotanlage (Druckspeicher, 2 bar). Die Speicherladung wird über die beiden roten 3-Wege-Ventile zwischen Vorrangspeicher (links, 1 m³, T_{max} = 120 °C) und den beiden Nachrangspeichern (rechts, 2 x 1 m³, T_{max} = 110 °C) geregelt.
- 3 Vergleich der gemessenen mit der berechneten Momentanleistung des RefleC-Kollektors und seines Basiskollektors am Samstag, 21.8.2010.

In der Pilotanlage kommt der vom Fraunhofer ISE in Zusammenarbeit mit der Firma Wagner & Co. Solartechnik entwickelte RefleC-Kollektor bei 6 bar und bis zu 130 °C zum Einsatz (Abb. 1). Über eine Speicher-Kaskade (Abb. 2) wird Kessel-Zusatzwasser auf bis zu 90 °C und Kessel-Speisewasser auf bis zu 120 °C vorgewärmt. Weiterhin wird bei 60 °C Prozess-Warmwasser für die Waschmaschinen bereitgestellt. In Abb. 3 haben wir die gemessene, tatsächliche Momentanleistung des RefleC-Kollektors und einer Referenz-Kollektorreihe mit der berechneten verglichen. Grundlage der Leistungsberechnung sind die am TestLab Solar Thermal Systems gemessenen Wirkungsgradkennlinien, die durch Strahlverfolgungssimulation ermittelten IAM-Werte der beiden verglichenen Teilfelder sowie die an der Pilotanlage gemessenen Werte (Einstrahlung, Ein- und Austrittstemperaturen und Massenströme). Es ist deutlich erkennbar, dass der RefleC-Kollektor mit zunehmendem transversalem Einstrahlwinkel (Ebene senkrecht zu den Reflektoren) ein Mehrfaches der Leistung des Referenzkollektors erbringt. Diese steigt bei Austrittstemperaturen über 120 °C und einem transversalen Einstrahlwinkel von 27° auf nahezu das Dreifache an (Abb. 3, 13:50 Uhr). Die berechnete Leistung stimmt mit der gemessenen sehr gut überein, das Kollektorfeld als Ganzes und die einzelnen Teilfelder arbeiten also mit der theoretisch zu erwartenden Leistungsfähigkeit.





4

Die Analyse der Monitoringdaten zeigt, dass der RefleC-Kollektor bei Eintrittstemperaturen über 80 °C um ca. 89 % höhere Erträge erreicht als der Referenzkollektor ohne Reflektoren. Der solare Deckungsgrad an den unterstützten Prozessen betrug 15 %. Durch die Solaranlage und durch eine bessere zeitliche Abstimmung der Wärmeverbräuche der Wäscherei konnte einer der beiden Gaskessel stillgelegt werden, was zu einer lastbereinigten Gaseinsparung von 8 % führte.

Im IEE-Projekt »SO-PRO« (Solar Process Heat) haben wir sechs Regionen in Europa bei der Marktentwicklung für solare Prozesswärme unterstützt. Aufbauend auf regionale Bestandsaufnahmen und ein Screening von 60 Industriebetrieben wurden vier Prozesse für die Einbindung von Solarenergie identifiziert:

- Erwärmen von Wasser für Wasch- oder Reinigungszwecke
- Erwärmen von Kessel-Zusatzwasser für Dampfnetze
- Heizen von Bädern oder Behältern
- konvektive Trocknung mit Heißluft

Für jeden dieser Prozesse haben wir typische Lastprofile ermittelt und Beispiel-Systemkonzepte (Abb. 4) entwickelt. Über TRNSYS-Simulationen wurden dann für die sechs europäischen Regionen Auslegungs-Nomogramme zur Vordimensionierung (Abb. 5) erstellt. In einem Planungsleitfaden (SO-PRO Design

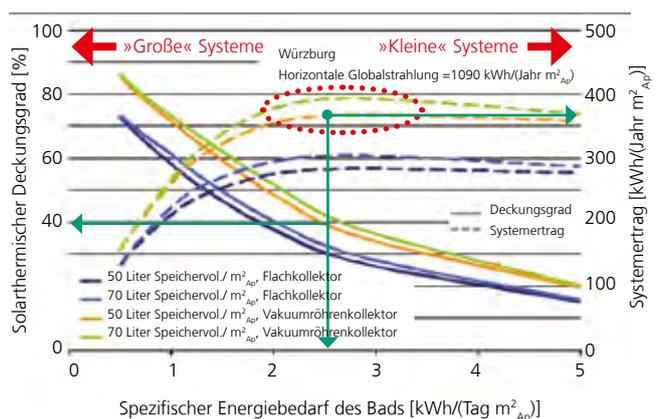
4 Beispiel-Systemkonzept für die solare Beheizung eines Galvanikbads.

Guide), ist neben diesen Ergebnissen auch ein integraler Planungsansatz für solare Prozesswärme dokumentiert. Die im IEE-Projekt »SO-PRO« entwickelten Hilfsmittel haben wir im Rahmen zahlreicher regionaler und internationaler Schulungen an Solarfirmen, Prozessplaner und Energieberater für die Industrie vermittelt.

Unsere Arbeiten zu Kollektorentwicklung und Monitoring wurden im Rahmen des Programms »Solarthermie2000plus« unterstützt. Die Erarbeitung der Planungshilfen und die Durchführung von Schulungen wurden von der EU gefördert.

www.solar-process-heat.eu
www.solar-process-heat.eu/guide

5 Auslegungsnomogramm auf Basis von Parametervariationen in Simulationen des in Abb. 4 dargestellten Systems (Arbeitszeit von 06:00-22:00 Uhr, nachts und an Wochenenden um 80 % reduzierter Energiebedarf, keine Betriebsferien, Kollektorneigung 35°, Südausrichtung). Rot eingekreist ist ein sinnvoller Designraum.



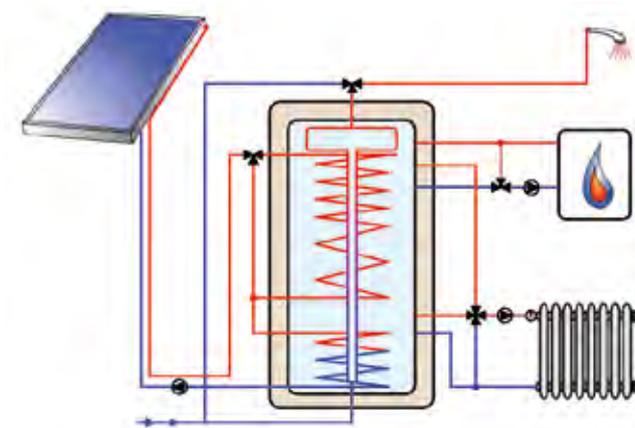


SolarAktivhaus – HEIZEN MIT HOHEN SOLAREN DECKUNGSANTEILEN

Solarwärmanlagen, die neben der Trinkwassererwärmung auch die Raumheizung unterstützen, werden in Deutschland heute standardmäßig eingesetzt. Typischerweise decken diese etwa 25 % des Gesamtwärmebedarfs eines gut gedämmten Einfamilienhauses. Die Vision der deutschen und der europäischen Solarthermie-Technologieplattform ist jedoch das zu 100 % solarthermisch beheizte Gebäude. Als Zwischenschritt werden zunehmend sogenannte SolarAktivhäuser gebaut, die zwischen 50 und 100 % ihres Gesamtwärmebedarfs mit Solarwärme decken. Das Fraunhofer ISE untersucht dieses Heizkonzept mit dem Ziel, dessen Funktionsfähigkeit in realisierten Gebäuden zu evaluieren, dessen Optimierungspotenziale zu erarbeiten und das Heizkonzept mit anderen Nullenergiegebäudekonzepten vergleichbar zu machen.

Axel Oliva, Gerhard Stryi-Hipp, Werner Platzer

1 Das »Solaroffice Seeborn« wird im Rahmen des Projekts »HeizSolar« vermessen.

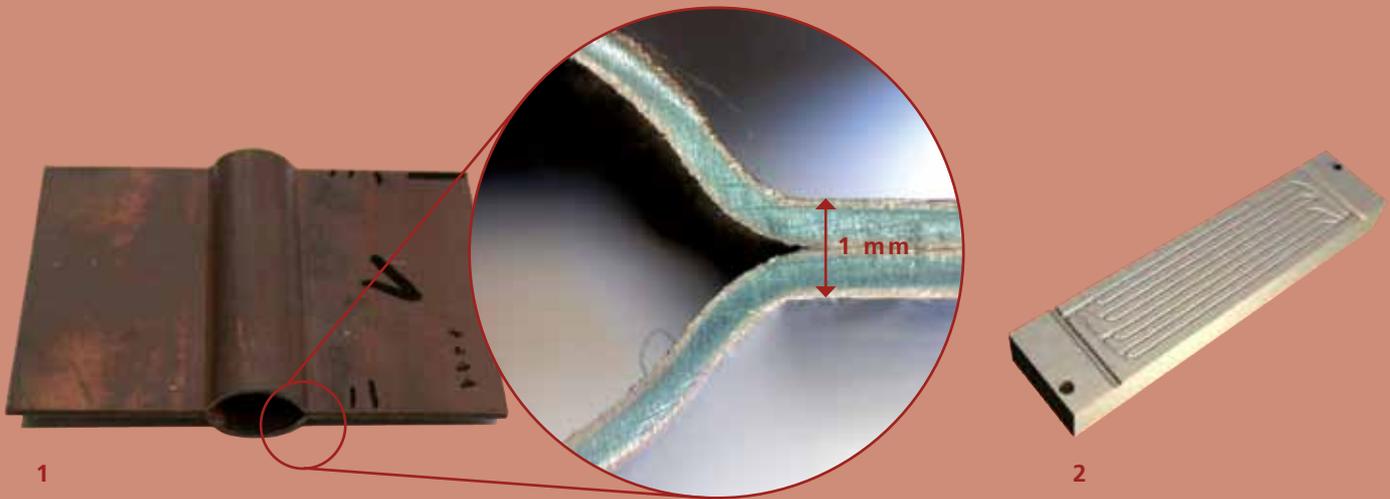


2 Typisches Anlagenschema einer solarthermischen Anlage mit hohem solaren Deckungsanteil.

Etwa 1000 SolarAktivhäuser mit einem solaren Deckungsanteil zwischen 50 und 100 % wurden bislang gebaut. Es handelt sich in der Regel um Einfamilienhäuser, die eine verbesserte Wärmedämmung mit einem spezifischen Transmissionswärmeverlust zwischen 0,2 und 0,3 W/(m²K), eine Solarkollektorfläche zwischen 30 und 60 m² und einen Wärmespeicher zwischen 6 und 10 m³ Wasserinhalt aufweisen. Hohe solare Deckungsanteile erfordern die saisonale Speicherung eines Teils der im Sommer solar erzeugten Wärme bis in die Heizperiode. Ein wesentlicher Teil der solaren Heizwärme wird auch in der Heizperiode erzeugt, indem die Solarkollektoren in einem steilen Aufstellwinkel nach Süden orientiert montiert werden. Dementsprechend ist im SolarAktivhaus das Optimum bezüglich Wärmeverlusten, solaren Wärmegewinnen und saisonaler Speicherung zu finden.

Im Projekt »HeizSolar« evaluiert das Fraunhofer ISE gemeinsam mit Solar- und Wärmetechnik Stuttgart, der Technischen Universität Ilmenau und dem Sonnenhaus-Institut das Konzept der SolarAktivhäuser mit dem Ziel, dieses zu bewerten und zu optimieren. Dazu werden aktuell neun typische SolarAktivhäuser vermessen, um deren Funktionalität in der Praxis und die real erzielten Deckungsanteile zu ermitteln. Für die Gebäude wird ein Simulationsmodell erarbeitet und mit den Messwerten validiert. Auf Basis von Variantenanalysen wird das Optimierungspotenzial des solaren Heizkonzepts erarbeitet. Ein Konzept zur vergleichenden Bewertung des solaren Heizkonzepts mit anderen emissionsarmen Gebäudekonzepten soll dazu beitragen, das Potenzial der SolarAktivhäuser abzuschätzen.

Das Projekt »HeizSolar« wird durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) sowie den Projektträger Jülich (PTJ) gefördert.



STAHLABSORBER AUF BASIS PARTIELL PLATTIERTER HYBRIDHALBZEUGE

Der größte Kostenfaktor in solarthermischen Kollektoren ist der Absorber. Um diese Kosten zu reduzieren, verfolgen wir gemeinsam mit dem Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL, TU Dortmund) den Ansatz, zum einen die bisher verwendeten Materialien Aluminium und Kupfer durch kostengünstigen Stahl weitgehend zu ersetzen, und zum anderen ein Herstellverfahren zur Massenfertigung von Solarabsorbern zu testen. Das untersuchte Verfahren kombiniert partielles Walzplattieren mit Innenhochdruckumformen (IHU). Es bietet die Möglichkeit sehr flexibler Kanalstrukturen, sodass wir ein Design mit von uns entwickelten bionischen FracTherm®-Strukturen und unterschiedliche Kanalhöhen entwerfen konnten.

Max Bauch, Wolfgang Graf, Michael Hermann, Michael Klemke, **Lotta Koch**, Werner Platzer

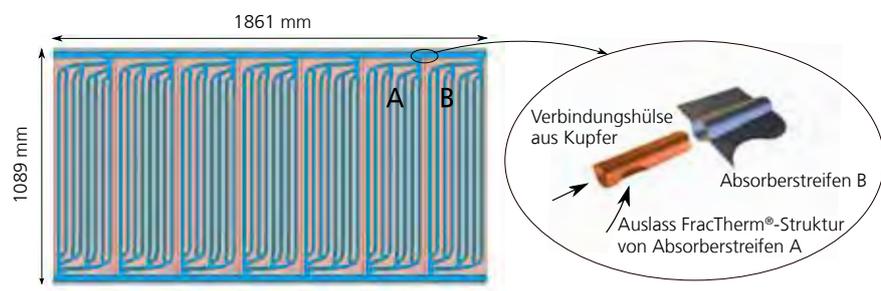
Der am Fraunhofer ISE entwickelte solarthermische Absorber besteht aus einem Verbund zweier Stahlplatten, die in einem ersten Walzschritt beidseitig mit einer wenige Hundertstel Millimeter dicken Kupferschicht plattiert werden (Abb. 1). Ein Trennmittel wird auf den Vorverbund Kupfer-Stahl-Kupfer aufgebracht und dieser in einem weiteren Walzschritt auf einen zweiten Vorverbund plattiert. Dieser partiell plattierte Verbund wird nun in ein Werkzeug (Abb. 2) ausgeformt und mit Anschlüssen versehen. Das Verfahren ähnelt dem Rollbond-Verfahren, ist jedoch flexibler sowohl in der

- 1 Demonstrator kanal mit vergrößerter Ansicht zur Darstellung des Schichtaufbaus Kupfer-Stahl-Kupfer. Ein Kupfer-Stahl-Kupfer Schichtaufbau gewährleistet innen und außen Korrosionsschutz gegen das Solarfluid bzw. die Umgebung und bietet eine gute Substratschicht für eine selektive Schicht.
- 2 CAD-Modell des IHU-Werkzeugs.

Materialauswahl als auch in der Gestaltungsmöglichkeit der Kanäle. Um einen hohen Kollektorwirkungsgradfaktor F' bei gleichzeitig niedrigem Druckverlust zu erreichen, haben wir in Studien die Querschnittsform variiert. Hierfür haben wir die bestehenden Modelle für F' und den Druckverlust angepasst und erste Messungen zur Validierung der Modelle und zur Ermittlung empirischer Korrekturfaktoren an unserem Fluidodynamik-Messstand durchgeführt. Die Kanalstruktur wurde mit dem sogenannten FracTherm®-Algorithmus, der eine gleichmäßige Durchströmung bei gleichzeitig niedrigem Druckverlust zum Ziel hat, ausgelegt. Mit dem beschriebenen Verfahren kann erstmals ein Absorber mit einer quasi fraktalen Kanalstruktur (6 mm Höhe) und Sammelkanäle mit größerem Querschnitt (20 mm Höhe) in einem Schritt gefertigt werden. Aus fertigungstechnischen Gründen wurde ein modulares Absorberkonzept mit Kupferhülsen als Verbindungselement entwickelt (Abb. 3).

Das Projekt wird vom Institut für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der TU Dortmund geleitet und von der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. (FOSTA) gefördert.

- 3 Das dargestellte modulare Absorberkonzept bietet die Möglichkeit sehr flexibler Absorber- und somit Kollektorabmaße.





HOCHEFFIZIENTE LUFTKOLLEKTOREN ZUR HEIZUNGSUNTERSTÜTZUNG

Mit dem von der Kollektorfabrik GmbH & Co. KG entwickelten, hocheffizienten Vakuumröhren-Solarluftkollektor können hohe Lufttemperaturen bei guten Wirkungsgraden erzielt werden. Die erwärmte Luft kann direkt für thermische Prozesse oder in Klima- und Lüftungsanlagen genutzt werden. Durch das hohe nutzbare Temperaturniveau können mit einem zusätzlichen Luft-Wasser-Wärmeübertrager aber auch stagnationssichere und großflächige Solaranlagen zur solaren Heizungsunterstützung und Trinkwassererwärmung realisiert werden. In einem Feldtest mit sieben Demonstrationsanlagen soll geklärt werden, wie gut der Kollektor – auch in Hinblick auf den zusätzlichen Strombedarf durch einen Ventilator – für diese Anwendung geeignet ist.

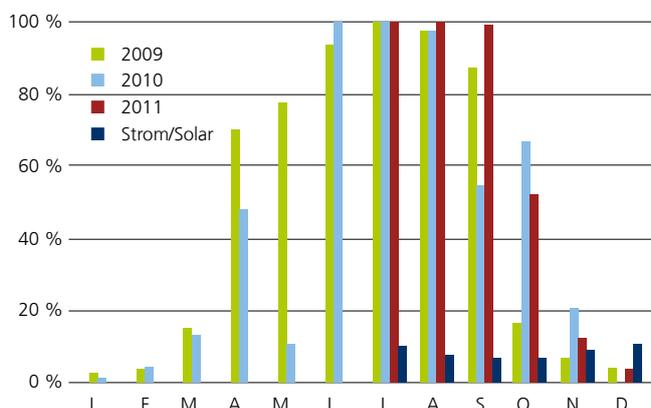
Korbinian Kramer, Gerhard Stryi-Hipp, **Christoph Thoma**, Werner Platzer

1 Drei Vakuumröhren-Solarluftkollektoren mit insgesamt 27,5 m² Bruttokollektorfläche. Im mittleren Teil des Kollektors ist der horizontale Luftsammelkanal zu erkennen. Neben dem Kollektor werden auf dem Dach der Ventilator und Wärmeübertrager, als eine für diese Kollektoren entwickelte Wärmeübertragereinheit, installiert.

In den Anlagen ist eine gute Wärmeübertragung von Luft auf Wasser oder ein Wasser-Glykol-Gemisch bei geringem Druckverlust ein wichtiger Aspekt. Im Projektverlauf wurde eine Wärmeübertragereinheit mit Wärmeübertrager und Ventilator entwickelt. Der Ventilator zeichnet sich durch einen drehzahlgeregelten Energiesparmotor mit geringer Leistungsaufnahme aus.

Bei der Messtechnik zur Vermessung des Kollektors wurde versuchsweise eine kostengünstige Variante untersucht, die auch mit dem Solarregler erfasst werden kann. Die Messstrecke wurde vor dem Feldeinsatz im Labor kalibriert. Bedingt durch häufige Sensordefekte zeigte sich aber, dass diese Messtechnik für genaue Vermessungen nicht ausreichend ist. Daher wurde in zwei Anlagen zusätzlich hochwertige Messtechnik zur genauen Auswertung installiert.

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



2 Monatliche Deckungsgrade der Solaranlage. Die Jahre 2009 und 2010 wurden zur Optimierung der Solaranlage genutzt. Seit Juli 2011 ist eine hochwertige Messtechnik installiert. Dunkelblau dargestellt ist für 2011 das Verhältnis von Antriebsenergie zur gelieferten Energie. Im Juli 2012 werden das Messintervall mit der hochwertigen Messtechnik abgeschlossen sein und die Kennzahlen der Anlage vorliegen.



BETRIEBSERFAHRUNGEN MIT MEMBRANDESTILLATIONSANLAGEN

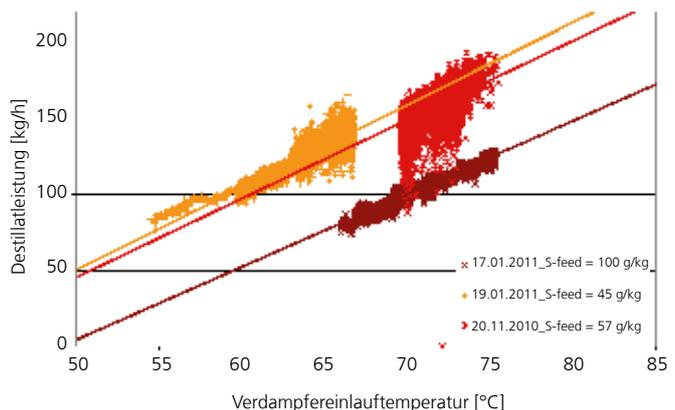
Durch die Aufbereitung von Meer- und Brackwasser werden weltweit täglich ca. 70 Mio. m³ Trinkwasser bereitgestellt. Infrastrukturschwache und dezentral gelegene Gebiete profitieren allerdings nicht von den eingesetzten Großtechnologien. Hier ist die Entwicklung kleiner, autark arbeitender Entsalzungssysteme notwendig. Die Versorgung solcher Systeme in ariden und semiariden Zonen mit Solarenergie ist aufgrund der dortigen meteorologischen Gegebenheiten hervorragend möglich. Am Fraunhofer ISE entwickeln wir thermisch getriebene Membrandestillationsanlagen, die zur Aufbereitung von Meer- oder Brackwasser zu Trinkwasser geeignet sind und durch einen Antrieb mittels Solarthermie oder Abwärme vollkommen energieautark arbeiten können.

David Düver, Florian Groß, Mario Hillebrand, Joachim Koschikowski, Martin Rolletschek, Daniel Pfeiffle, Rebecca Schwantes, Marcel Wieghaus*, Daniel Winter, Werner Platzer

* SolarSpring GmbH

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 Grenzflächen der Membran aufgebaut werden. Am Fraunhofer ISE entwickeln und implementieren wir MD-Module, Systeme sowie Pilotanlagen zur Meer- und Brackwasserentsalzung. Zur Auslegung haben wir Simulationsmodelle entwickelt, die wir an Testständen im Labor für verschiedenste Betriebsbedingungen validiert haben. Zur Herstellung der Entsalzungsmodule verfügen wir über die notwendigen Maschinen, um selbst Module, die auf die jeweilige Anwendung abgestimmt sind, herstellen zu können.

1 Membrandestillationsanlage auf Gran Canaria – 12 MD-Module, 190 m² Kollektorfläche und 7 m³ Wärmespeicher für Nachtbetrieb (links). Die Anlage ist seit Frühjahr 2011 in Betrieb und produziert bis zu 200 l/h. Die Entsalzungsanlage sowie wesentliche Teile der Hydraulik sind in einen 20 ft Container eingebaut (rechts).



2 Experimentelle Bestimmung des Destillatetrags in Abhängigkeit der Verdampfeinlauftemperatur auf Pantelleria (Italien).

Im Rahmen des EU-Projekts »MEDIRAS« haben wir eine solar- und eine abwärmebetriebene Entsalzungsanlage mit nominellen Tagesleistungen von 3,5 und 5 m³ auf Gran Canaria (Abb. 1) und auf Pantelleria installiert. Eine weitere solarbetriebene Anlage konnte im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts »CUVEWATERS 2010« im Norden Namibias in Betrieb genommen werden. Die Betriebserfahrungen haben dabei eine gute Übereinstimmung mit den simulierten Auslegungswerten gezeigt. Ebenfalls konnte der Einfluss der oberen Betriebstemperatur und des Salzgehalts auf die Destillatleistung untersucht werden (Abb. 2). Bei dem Betrieb der Anlage in Namibia konnten umfangreiche Untersuchungen zum Verkalkungsverhalten durchgeführt werden und Gegenmaßnahmen wie Spülzyklen mit Säure entwickelt und getestet werden.

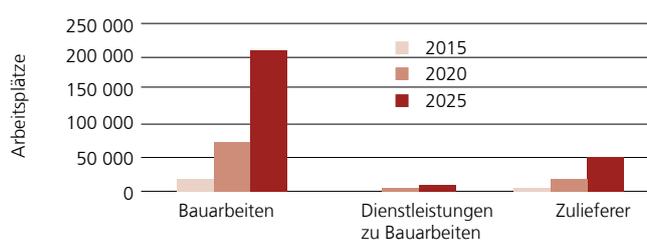


SOLARTHERMISCHE KRAFTWERKE – EIN GEWINN FÜR ALLE

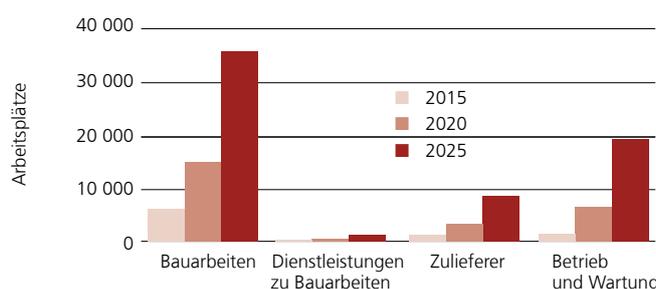
Weltweit ist ein starker Ausbau der Kapazitäten von solarthermischen Kraftwerken zu erwarten. Bis dato werden diese Concentrated Solar Power (CSP)-Kraftwerke vor allem in Südeuropa und den USA errichtet, obwohl Nordafrika und der Mittlere Osten global das größte Anwendungspotenzial und damit die besten Chancen für diese Technologie aufweisen. Die Region könnte wirtschaftlich sehr stark vom Aufbau von CSP-Kraftwerkskapazitäten profitieren. Eine Studie für die Weltbank unter Federführung des Fraunhofer ISE untersuchte das Potenzial.

Christoph Kost, Gabriel Morin, Werner Platzer

1 Solarthermisches Parabolrinnenkraftwerk Andasol 1, Spanien.



2 Kumulativ geschaffene Einjahresarbeitsplätze bis zum Jahr 2015, 2020 und 2025 während der Bauphase im Transformations-szenario (Ausbau der CSP auf 5 GW bis zum Jahre 2020).



3 Anzahl Arbeitsplätze mit CSP-Bezug im Jahr 2015, 2020 und 2025.

Der Erfolg und die Akzeptanz von solarthermischen Kraftwerksbauten in den fünf untersuchten Ländern (Ägypten, Algerien, Jordanien, Marokko und Tunesien) hängen stark von der Integration und Partizipation der lokalen Industrie ab. Deshalb ist es wichtig, die mögliche Teilnahme der lokalen Industriezweige in diesem Geschäftsfeld genau zu kennen.

Die Studie »MENA Assessment of Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power (CSP) Projects« wurde vom Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE und dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI in Kooperation mit Ernst & Young erstellt. In Zusammenarbeit mit der Industrie in Nordafrika und Europa haben wir die CSP-Wertschöpfungskette, die Produktionsprozesse für Kernkomponenten eines solarthermischen Kraftwerks sowie die Industriepotenziale in den MENA-Ländern analysiert. Unsere Studie beruht auf einer Analyse der Technologieanforderungen von der einfachen Bautätigkeit (z. B. Fundamente) bis hin zu Fertigung spezialisierter Teilkomponenten (z. B. Vakuumreceiver). Auch die Struktur und Möglichkeiten der Unternehmen in den MENA-Ländern haben wir untersucht. Abhängig von industriellen Schwerpunkten sowie von der regionalen Marktentwicklung kann sich die lokale Wirtschaft unterschiedlich stark integrieren. Insgesamt kann die lokale Wertschöpfung bei CSP-Kraftwerken in der MENA-Region durchschnittlich bis zu 60 % erreichen, was 14,3 Mrd. US\$ entspricht. Bis 2025 können so 60 000 bis 80 000 neue, teils hoch qualifizierte, permanente Arbeitsplätze in der MENA-Region entstehen. Damit profitieren die Länder vom Aufbau von Fertigungskapazitäten und umfangreichen Infrastrukturbauprojekten im Bereich erneuerbarer Energien, wenn sie ihre regionalen Vorteile ausschöpfen und Marktbarrieren abbauen. Auch die europäischen Anlagenbauer und Komponentenlieferanten sehen mittelfristig große Wachstumschancen in diesem Markt. Europa und MENA können so aus dem enormen Solarstrompotenzial der Region durch neue Absatzmärkte Nutzen ziehen.



HOCHTEMPERATURSPEICHERKONZEPT MIT PHASENWECHSELMATERIALIEN

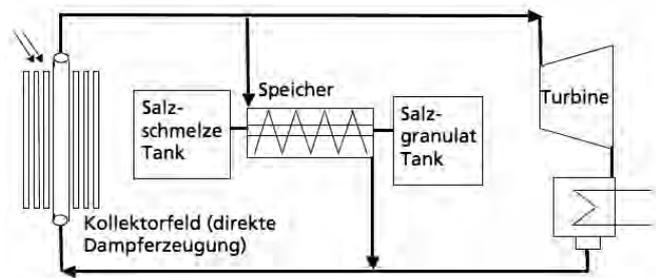
Die Entwicklung effizienter thermischer Speicher zur Be-/Entladung mit Dampf ist notwendig, um in Kraftwerken mit direktverdampfenden Solarkollektoren Energie unabhängig vom aktuellen solaren Strahlungsangebot bereitzustellen. Phasenwechselfpeicher sind hierfür optimal geeignet. Aufgrund technischer Herausforderungen, z. B. der niedrigen Wärmeleitfähigkeit der Materialien, gibt es derzeit keine marktfähigen Latentspeicher. Wir entwickeln ein neuartiges Latentspeicherkonzept, bei dem der Phasenwechsel in einem Schneckenwärmeübertrager stattfindet. So kann Latentwärme effizient und wirtschaftlich gespeichert werden. Die Machbarkeit des Konzepts wurde bereits nachgewiesen. Wir bauen einen Laborprototypen auf, den wir vermessen und optimieren werden.

Stefan Gschwander, **Anton Neuhäuser**, Peter Nitz, Verena Zipf, Werner Platzer

Die direkte Dampferzeugung in solarthermischen Kollektoren ermöglicht eine hohe Effizienz durch Anhebung der Arbeitstemperatur bei gleichzeitiger Einsparung des zweiten Fluidkreislaufs im Solarfeld. Ein Speicher ist erforderlich, um die Verfügbarkeit zu erhöhen (Abb. 2). Für eine Be- und Entladung mit zweiphasigen Medien wie Wasser/Dampf sind sensible Zweitankspeicher nicht sinnvoll, da sie hohe Exergieverluste bei der Speicherung erzeugen. Stattdessen sind Phasenwechselmaterialien (PCM) exergetisch optimal geeignet, weil aufgrund ihrer charakteristischen isothermen Phasenumwandlung hohe Gradienten bei der Wärmeübertragung minimiert werden.

Momentan stellt die schlechte Wärmeleitfähigkeit der PCM eine Herausforderung dar, die ein marktfähiges Speicherkonzept bis jetzt verhindert, da sie unwirtschaftlich große Wärmetauscherflächen erforderlich macht. In unserem

1 *Zweiwelliger Schneckenwärmeübertrager: die Hohlwelle, Hohlflügel und der Trog sind von einem Wärmeträgerfluid durchströmt. Das PCM wird im Inneren des Trogs geschmolzen/kristallisiert und in einen Tank transportiert.*



2 *Möglichkeit der Einbindung des neuartigen Hochtemperaturspeichers in ein direktverdampfendes solarthermisches Kraftwerk (Speicherbeladung).*

neuartigen Konzept wird ein Schneckenwärmeübertrager (Abb. 1) eingesetzt, der mit Dampf be- und entladen wird. Der Phasenwechsel findet während der Förderung entlang der Wärmeübertragerflächen statt, das Material wird anschließend in einem separaten Tank gespeichert. Dadurch wird die Speicherkapazität sowie die Be- und Entladegeschwindigkeit von der Größe der Wärmeübertragerfläche entkoppelt.

Im Labormaßstab bauen wir nun den Versuchsspeicher auf und statten ihn mit umfassender Messtechnik aus. Damit wollen wir Simulationsprogramme anhand von Versuchsreihen validieren und die Speicherauslegung optimieren.

Unsere Entwicklung eines effizienten und wirtschaftlichen Hochtemperaturspeichers wird von der E.ON International Research Initiative unterstützt.

STROM AUS SONNENLICHT



SILICIUM-PHOTOVOLTAIK

Die Photovoltaik erlebt seit mehreren Jahren einen Boom, der mit einer starken Kostenreduktion einhergeht. Die weltweite Produktion von Solarzellen lag 2011 bei 27 GW_p, was einer Wachstumsrate von 60 Prozent gegenüber 2010 entspricht.

Mehr als 85 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 Hochdurchsatz-Epitaxie von Siliciumschichten sowie der Entwicklung von blockkristallisiertem Silicium. Für die Blockkristallisation verfügen wir 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. Die wissenschaftlichen Schwerpunkte unserer Arbeiten liegen in der Verbesserung des Kristallisationsprozesses hin zu höchsteffizienzfähigen Siliciumkristallen sowie in der Anpassung der Kristallisationsprozesse an das jeweils spezifische Silicium, z. B. gereinigtes metallurgisches Silicium («Upgraded Metallurgical Grade Silicon/UMG»).

Das Konzept der kristallinen Silicium-Dünnschichtszelle kombiniert qualitativ sehr hochwertige kristalline Siliciumschichten mit Methoden aus der Dünnschichtszellenherstellung und kann dadurch potenziell sehr niedrige Kosten für PV-Module erzielen. Für dieses Konzept entwickeln wir spezifische Anlagen und Prozesse. Schwerpunkte unserer Arbeit sind Anlagen für Hochdurchsatz-Siliciumabscheidung und -Zonenschmelz-Rekristallisation sowie angepasste Prozesse für Substrat-, Schicht- und Solarzellenherstellung.

Durch die vertikale Integration unserer Arbeit vom Substrat bis zum integriert verschalteten Submodul können wir die Einzelschritte maßgeschneidert aufeinander abstimmen. Auf etwa 1000 m² Laborfläche im SIMTEC und in spezialisierten Laboren für Kristallisation, Nasschemie, Solarzellenprozessierung und Charakterisierung haben wir beste Rahmenbedingungen, um unsere Ziele erreichen zu können.

Eine zentrale Aufgabe unseres ETALab[®] ist die Entwicklung und Analyse von hocheffizienten Solarzellenkonzepten und -prozessen, um mit kosteneffektiven Prozessen höhere Wirkungsgrade zu erzielen und damit die Voraussetzung für eine substanzielle Kostensenkung in der Silicium-Photovoltaik zu schaffen. ETA steht dabei für Effizienz, Technologie und Analyse. Bei den Solarzellenkonzepten liegt unser Fokus auf rückseitig kontaktierten Zellen und Strukturen für n-Typ Silicium. Das ETALab[®] umfasst eine ausgezeichnete Prozessinfrastruktur im 500 m² großen Reinraumlabor, die es uns ermöglichte, mehrere internationale Rekordwirkungsgrade zu erzielen. Zusätzlich stehen uns ca. 900 m² Einzellaborflächen zur Verfügung, um effektive Oberflächenpassivierungsschichten, neuartige Metallisierungs- und Dotierverfahren, innovative Nanostrukturierungstechnologien und neue Charakterisierungsmethoden zu entwickeln.

In unserem Photovoltaik Technologie Evaluationscenter PV-TEC können wir auf über 1200 m² Technologiefläche im Pilotmaßstab, d. h. mit einem Durchsatz von mehr als 100 Wafern pro Stunde, sowohl Solarzellen mit industriell üblichen siebgedruckten Kontakten als auch mit hochwertiger Oberflächenpassivierung und neuartiger Verschaltungsarchitektur herstellen. Für die verschiedenen Technologiebereiche stehen uns sowohl flexible halbautomatische als auch hochproduktive vollautomatische Anlagen für die Prozessentwicklung zur Verfügung. Schwerpunkte der produktionsnahen Technologieentwicklung für die kristalline Silicium-Photovoltaik liegen in den Bereichen Hochtemperatur- und Drucktechnologie, nass- und plasmachemische Verfahren sowie Laser und physikalische Gasphasenabscheidung. 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 maßgeblich an der Entwicklung neuer Charakterisierungsverfahren beteiligt, z. B. der bildgebenden Photolumineszenzmethode zur Analyse von Siliciummaterial und Zellen.

Das Photovoltaik Modul-Technologiecenter MTC am Fraunhofer ISE ermöglicht 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. Weitere Einzelheiten über diese Aktivitäten finden sich im Kapitel Photovoltaische Module und Systeme (s. S. 82 ff).

Unsere Aktivitäten im Bereich Siliciummaterial und -solarzellen am Standort Freiburg werden ergänzt durch das Labor- und Servicecenter LSC Gelsenkirchen (s. S. 65), 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. S. 12).

Im Silicium Material Technologie und Evaluationscenter SIMTEC arbeiten wir an der Qualitätsoptimierung von blockkristallisiertem Silicium. Eine Kristallisationsanlage zur Herstellung von 15 kg bis zu 250 kg schweren multikristallinen Blöcken wird ergänzt durch Säge- und Schleiftechnologie zur Fertigung von Wafern. Die wissenschaftlichen Schwerpunkte liegen in der Verbesserung des Kristallisationsprozesses hin zu höchsteffizienzfähigen Siliciumkristallen sowie in der Anpassung der Kristallisationsprozesse an das jeweils spezifische Solarsilicium, z. B. gereinigtes metallurgisches Silicium (Upgraded Metallurgical Grade Silicon/UMG).

ANSPRECHPARTNER

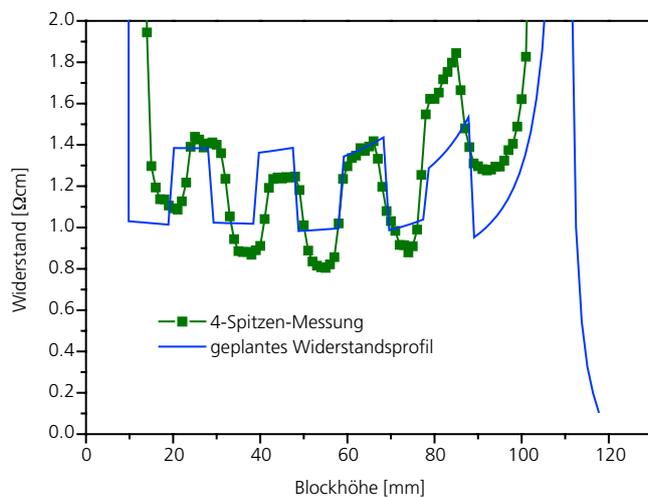
Feedstock, Kristallisation und Wafering	Dr. Stephan Riepe	Telefon +49 761 4588-5636 stephan.riepe@ise.fraunhofer.de
Kristalline Silicium-Dünnschichtsolarzellen	Dr. Stefan Reber	Telefon +49 761 4588-5248 stefan.reber@ise.fraunhofer.de
Industrielle und neuartige Solarzellenstrukturen	Dr. Stefan Glunz	Telefon +49 761 4588-5191 stefan.glunz@ise.fraunhofer.de
	Dr. Ralf Preu	Telefon +49 761 4588-5260 ralf.preu@ise.fraunhofer.de
Produktionsanlagen und Prozessentwicklung	Dr. Ralf Preu	Telefon +49 761 4588-5260 ralf.preu@ise.fraunhofer.de
	Dr. Stefan Glunz	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



DOPING ENGINEERING FÜR MULTIKRISTALLINES BLOCKSILICIUM

Die Nutzung von alternativen Siliciummaterialien für die Produktion von Siliciumblöcken ist ein Schwerpunkt der Arbeiten am Silicium Material Technologie und Evaluationscenter SIMTEC des Fraunhofer ISE. Um den Einsatz von kostengünstigem aufgereinigtem metallurgischem Silicium in der industriellen Produktion zu ermöglichen, entwickelten wir die Methode des sogenannten Doping Engineering. Bei dieser Methode wird der elektrische Widerstand über die Blockhöhe an die chemischen Eigenschaften des Feedstock-Materials angepasst. Dadurch können wir die Ausbeute eines Siliciumblocks im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren entscheidend verbessern. Die Analyse der Materialeigenschaften erfolgt direkt am aufgesägten Kristall oder am fertigen Wafer nach dem Drahtsägen im SIMTEC.

Alban Brettmeister, Fridolin Haas, **Stephan Riepe**,
Claudia Schmid, Mark Schumann, Andreas W. Bett

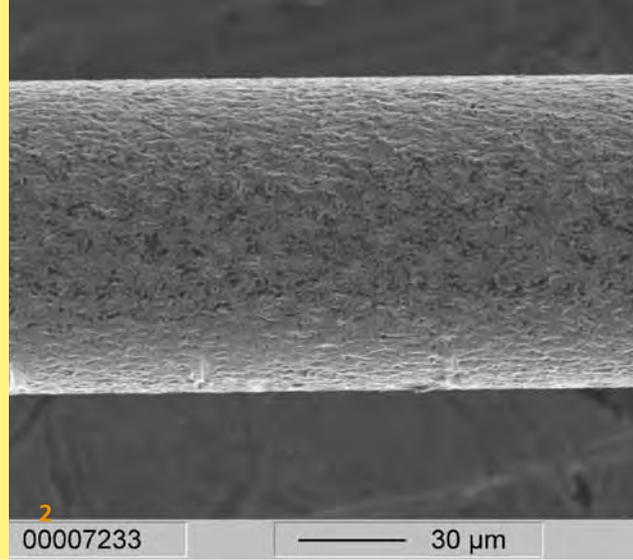


3 Widerstandsverteilung über die Blockhöhe eines G1 Testblocks, gemessen mit der 4-Spitzen-Methode. Das blaue Profil zeigt das im Rahmen der Prozessentwicklung geplante Widerstandsprofil.

1 Multikristalliner Block in der Forschungsgröße G1 (15 kg Silicium).
2 Photolumineszenz-Bild eines Querschnitts eines G1 Testblocks zum Doping Engineering. Die schrittweise Zugabe von Dotierstoffen in unterschiedlichen Höhen verursacht die als Streifen erkennbaren Unterschiede im PL-Signal.

Bei der Entwicklung von Upgraded Metallurgical Grade Silicon (UMG-Si) als kostengünstige Alternative zu herkömmlichem Silicium-Ausgangsmaterial (Feedstock) stellt ein über die gesamte Höhe des kristallisierten Blocks homogener elektrischer Widerstand eine große Herausforderung für die industrielle Produktion und damit für eine erfolgreiche Markteinführung dar. Die Eigenheit dieses Feedstocks ist, dass Bor- und Phosphorverunreinigungen in ähnlicher Höhe darin enthalten sind. Dies führt bei der Standard-Kristallisation zu teils erheblichen Ausbeuteverlusten durch den Umschlag von p-Typ zu n-Typ im oberen Blockbereich. Im Rahmen unserer Forschung an diesem Material untersuchen wir deshalb, wie wir den Einbau von Bor und Phosphor als Dotierstoffe in den Block manipulieren können. Zur Modellierung des Kristallisationsprozesses nutzen wir Simulationen mit der kommerziellen Software CGSim sowie Validierungsexperimente zur Bestimmung der Kristallisationsgeschwindigkeit und der Phasenfront zwischen Kristall und Schmelze während des Erstarrungsprozesses. Durch schrittweise Zugabe von Dotierstoffen, dem Doping Engineering, können wir mittlerweile den elektrischen Widerstand im gewünschten Zielbereich einstellen. Durch geeignete Wahl von Materialmenge und Zeitpunkt der Zudotierung gelingt es uns, den PN-Umschlag fast vollständig zu vermeiden (Abb. 2). Die Ausbeute steigt dadurch auf ähnliche Werte wie bei nicht kompensierten Siliciumblöcken. In der weiteren Forschung werden wir diesen Prozess in Hinsicht auf die erzielbaren Solarzellenwirkungsgrade optimieren.

Das Projekt wird von der Fraunhofer-Stiftung unterstützt.



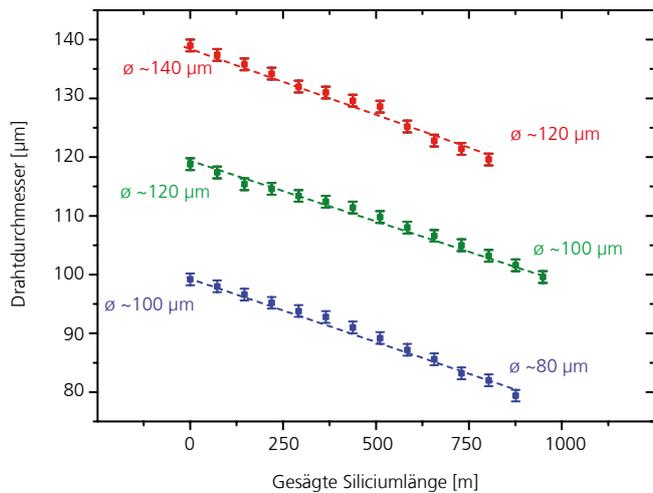
DRAHTSÄGEPROZESSENTWICKLUNG FÜR DIE WAFERHERSTELLUNG

Der Drahtsägeprozess ist die dominierende Technologie, um Siliciumwafer für die Photovoltaik herzustellen. Der Prozess basiert darauf, dass ein Siliciumblock durch ein Feld von mehreren hundert Drahtschlaufen geführt und dadurch das Siliciummaterial in Wafer zersägt wird. Am Silicium Material Technologie und Evaluationscenter SIMTEC liegt ein Schwerpunkt unserer Arbeiten auf der Weiterentwicklung des Drahtsägeprozesses. Um die Prozesssicherheit gegen Drahttriss während des Sägens zu erhöhen, untersuchten wir den Drahtverschleiß in Testschnitten unter industrierelevanten Prozessbedingungen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Drahtdurchmesser unabhängig vom Ausgangsdurchmesser konstant mit der Drahtbelastung abnimmt.

Philipp Häuber, Teresa Orellana, Stephan Riepe, **Bernd Weber**, Andreas W. Bett

Im industriellen Drahtsägeprozess mittels Vielspaltdrahtsägen werden immer dünnere Drähte eingesetzt, um den Materialverlust durch das Drahtsägen des zuvor kristallisierten Siliciums bei der Waferherstellung zu minimieren. Dies hat zur Folge, dass die Gefahr eines Drahttrisses während des Drahtsägeprozesses ansteigt. Gleichzeitig wird durch die Reduzierung der Drahtdurchmesser die Dicke der Wafer abhängig vom Sägefortschritt und der Position im Block beeinflusst. Im Rahmen unserer Entwicklungen zur Herstellung dünnerer Wafer haben wir daher die Auswirkungen des Drahtverschleißes untersucht. Dazu haben wir am SIMTEC Sägeversuche mit unterschiedlichen Drahtdurchmessern durchgeführt. Um einen industriellen Sägeverschleiß zu simulieren, wurde eine definierte Drahtlänge mehrfach belastet, bis der jeweilige Anfangsdrahtdurchmesser um 20 µm reduziert war. Durch Rasterelektronenmikroskopie (Abb. 2) konnten wir die Reduktion des Drahtdurchmessers in verschiedenen Prozessen quantifizieren. Abb. 3 zeigt die Entwicklung der gemessenen Drahtdurchmesser in Abhän-

- 1 Wafer eines multikristallinen Siliciumblocks in industrieller Qualität, hergestellt am SIMTEC.
- 2 REM-Aufnahme der Mantelfläche eines Stahldrahts nach dem Drahtsägeprozess. Die Oberfläche weist Indentierungen der Siliciumcarbidekörner auf. Der Draht mit Anfangsdurchmesser von 100 µm wurde durch den Drahtsägeprozess auf 80 µm reduziert.



- 3 Drahtdurchmesser von drei verschiedenen Drähten in Abhängigkeit der gesägten Siliciumlängen. Die Entwicklung der Drahtdurchmesser ist linear und unabhängig von den Anfangsdrahtdurchmessern.

gigkeit der Drahtbelastung. Alle getesteten Drähte weisen unabhängig vom Anfangsdurchmesser eine ähnliche lineare Entwicklung des Drahtverschleißes für identische Prozessparameter auf. Durch die Beschreibung des Drahtverschleißes ist es möglich, die Berillung der Drahtführungsrollen an den Drahtverschleiß für einen definierten Prozess anzupassen, um konstante Waferdicken über große Losgrößen zu erhalten.

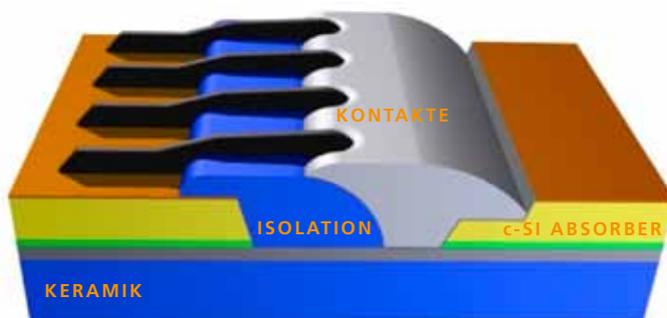
Die Arbeiten wurden durch die Europäische Kommission und die Fraunhofer-Stiftung gefördert.



KRISTALLINE SILICIUM-DÜNNSCHICHTSOLARZELLEN

Ein Spezialgebiet der kristallinen Siliciumsolarzellen sind die kristallinen Si-Dünnschichtsolarzellen (KSD). Sie verbinden die positiven Eigenschaften von Wafer-solarzellen und Dünnschichtsolarzellen und verfügen über einen hohen Wirkungsgrad bei niedrigem Siliciumverbrauch. Derzeit verfolgen wir zwei Konzepte, das Waferäquivalent, bei dem die KSD-Solarzellen größtenteils mit der hochentwickelten Prozesstechnologie für Wafersolarzellen hergestellt werden, und das integriert verschaltete Modul (IntegRex), das sich an den klassischen Dünnschichttechnologien anlehnt. Wir bearbeiten Themen vom Substrat bis hin zu speziell an die Dünnschichttechnologie angepassten Solarzellenprozessen.

Björn Debowski, Elke Gust, Stefan Janz, Miroslawa Kwiatkowska, Harald Lautenschlager, Stefan Lindekugel, Regina Pavlovic, Thomas Rachow, **Stefan Reber**, Kai Schillinger, Michaela Winterhalder, Andreas W. Bett



2 Konzept (Schema) des integriert verschalteten rekristallisierten Silicium-Dünnschichtmoduls (IntegRex). Eine Keramik wird mit einer Diffusionsbarriereschicht aus kristallinem Siliciumcarbid verkapselt. Darauf wird das Absorberschichtsystem aus Silicium aufgebracht und integriert verschaltet.

1 Zonengeschmolzene Siliciumschicht (rechts) auf einer mittels Atmosphärendruck-Gasphasenabscheidung (APCVD) verkapselten Keramik (100 x 100 mm²).

Die zentralen Themen der kristallinen Si-Dünnschichtsolarzellen sind neben der Substratentwicklung die notwendigen funktionalen Schichten sowie die speziell angepassten Solarzellen- und Modulkonzepte. Auf all diesen Gebieten erzielten wir am Fraunhofer ISE große Fortschritte. So leiteten wir ein Konsortium aus Firmen und Forschungsinstituten zur Entwicklung einer Zirkonsilikatkeramik, die sowohl aus Sicht der Kosten als auch aus technologischer Sicht perfekt als Substrat zu unserem IntegRex-Konzept passt.

Neben der erfolgreichen Herstellung von Zirkonsilikat-Substratmustern wurde im Konsortium eine virtuelle Produktionslinie definiert, die unmittelbar realisierbar ist. Für die Verkapselung der Substrate entwickelten wir eine gasphasenabgeschiedene Siliciumcarbidschicht (SiC), die eine Diffusion von Verunreinigungen in die photovoltaisch aktiven Si-Schichten effektiv unterdrückt. Bei der Auswahl der Prozesse achteten wir besonders auf ihre Skalierbarkeit und Kosteneffizienz. So standen neben der Konzeptherleitung die Entwicklung geeigneter Anlagen zur Schichtabscheidung sowie die Verbesserung von Anlagen zur Rekristallisation von Si-Schichten im Mittelpunkt unserer Arbeiten. Die ProConCVD Hochdurchsatzanlage, die für die Herstellung von hochwertigen Silicium- und SiC-Schichten konzipiert ist, bauten wir fertig auf, aktuell starten erste Experimente. Zusammen mit der Zonenrekristallisationsanlage ZMR400con steht uns damit die komplette Ausrüstung zur Verfügung, um die auf kleinen Flächen gewonnenen Erkenntnisse schnell auf produktionsrelevante Flächen zu übertragen und weiter zu verbessern.

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



NIEDERTEMPERATUR-DÜNNSCHICHTSILICIUM

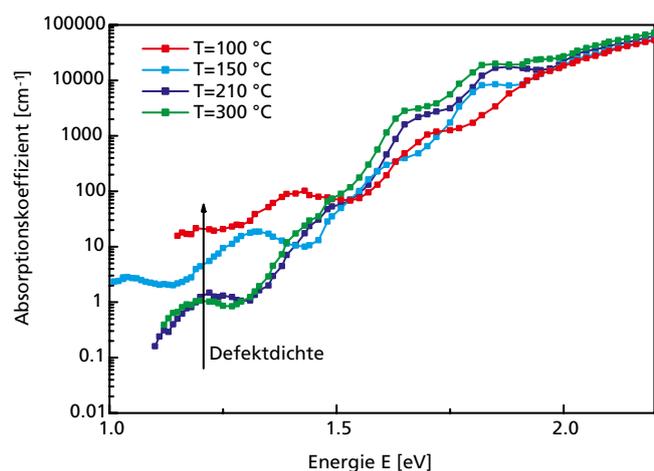
Am Fraunhofer ISE Labor- und Servicecenter (LSC) Gelsenkirchen haben wir 2011 die Silicium-Dünnschichttechnologie aufgebaut. Auf der neuen 3-Kammer Beschichtungsanlage wurden erste Beschichtungsprozesse für amorphe und mikrokristalline Schichten entwickelt. Zusammen mit Industriepartnern haben wir einen Demonstrator entwickelt, mit dem für die Dünnschichttechnologie wichtige Strukturierungsschritte durchgeführt und optimiert werden können. Parallel zum Technologieausbau haben wir die vorhandene Messtechnik so ergänzt, dass einzelne Schichten sowie Einfach- und Stapelzellen umfassend charakterisiert werden können.

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

Auf unserer neuen 3-Kammer Beschichtungsanlage (Abb. 1) haben wir erste Standardprozesse für amorphe und mikrokristalline Si-Schichten entwickelt. Für alle Schichten erreichen wir nun eine Homogenität besser als 3,5 %, auf einer Beschichtungsfläche von 37 cm x 37 cm. Die entwickelten Schichten werden wir zukünftig in Einfach- und Stapelsolarzellen einsetzen.

Im Rahmen des Forschungsprojekts »ALPS« (Angepasste Laserprozesse für Siliciumsolarzellen) wurde ein Demonstrator entwickelt, mit dem wir neue Lasersysteme bzw. neue Strahlformen testen wollen. Zusammen mit der großflächigen Beschichtungsanlage ermöglicht uns dieses System, Kleinmodule bis zu einer Größe von 30 cm x 30 cm herzustellen. Parallel zur Erweiterung der Technologie haben wir unsere Messtechnik zur Schicht- und Zellcharakterisierung weiter ausgebaut. Ein zentrales Element war der Aufbau eines Messplatzes, der die Messung der externen Quanteneffizienz (EQE) für

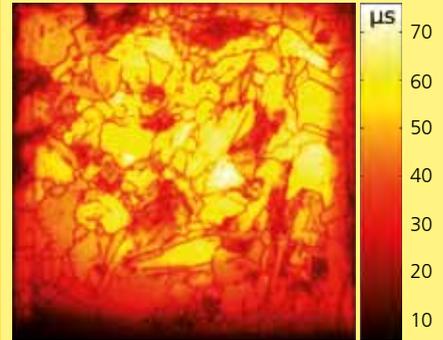
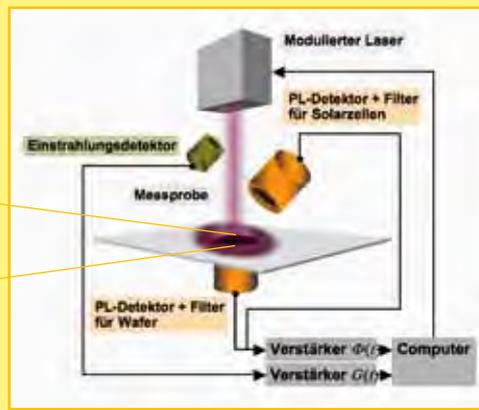
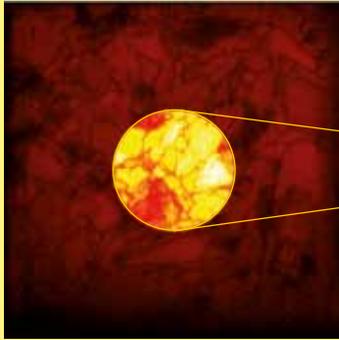
1 Neue 3-Kammer Beschichtungsanlage für die Herstellung von Silicium-Dünnschichtsolarzellen.



2 CPM-Messung für undotierte amorphe Si-Schichten, die bei verschiedenen Temperaturen abgeschieden wurden. Je größer der Absorptionskoeffizient α bei kleinen Energien ist, desto höher ist die Defektdichte im Material.

Einfach- und Tandemzellen erlaubt. Durch eine Erweiterung der Hardware konnten wir auch die CPM-Methode (Constant Photocurrent Method) auf dem Messplatz implementieren. Sie ermöglicht die quantitative Bestimmung der Defektdichte in amorphem Silicium, die ein direktes Maß für die Qualität der Schichten darstellt (Abb. 2).

Das Projekt »ALPS« wird vom Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Landwirtschaft, Natur- und Verbraucherschutz des Landes Nordrhein-Westfalen gefördert.



1

QUASISTATISCHE LUMINESZENZ ZUR PRÄZISEN LEBENSDAUERMESSUNG

Die Ladungsträgerlebensdauer in Silicium ist für Forschung und Entwicklung sowie für die industrielle Prozesskontrolle in der Photovoltaik eine entscheidende elektrische Materialeigenschaft, die den Wirkungsgrad einer Solarzelle maßgeblich bestimmt. Konventionelle Methoden zur Lebensdauerbestimmung können systematische Fehler aufweisen – insbesondere in für die Photovoltaik interessanten neuen Materialien mit relativ kleinen Lebensdauern. Zeitabhängige Messverfahren auf der Basis von Lumineszenz, z. B. der quasistatischen Lumineszenz, bieten die Möglichkeit, sämtliche bekannte Artefakte bei Lebensdauermessungen zu umgehen. Gegenwärtig lassen sich Lebensdauern bis zu einer Untergrenze von 1 μs zuverlässig bestimmen, vom sägerauen Wafer über alle Produktionsstadien bis zur Solarzelle.

Johannes A. Giesecke, Wilhelm Warta, Stefan Glunz

Anstrengungen zur Kostensenkung bei der Herstellung von Siliciumsolarzellen haben das Spektrum der Ausgangsmaterialien erheblich erweitert. Alternative Materialaufbereitungsarten, z. B. von metallurgischem Silicium (sowohl mono- als auch multikristallin), weisen ein hohes Kostensenkungspotenzial auf. Allerdings stoßen momentan etablierte Messmethoden insbesondere bei derartigen neuen Materialien an ihre Grenzen bezüglich der zuverlässigen Messbarkeit der Ladungsträgerlebensdauer. Zu den Gründen zählen z. B. der Einfang von Ladungsträgern in Haftstellen, die oft vorausgesetzte Messbarkeit oder Bekanntheit von Dotierung und Ladungsträgermobilitäten oder optische Artefakte bedingt durch Oberflächenmorphologie und Absorption.

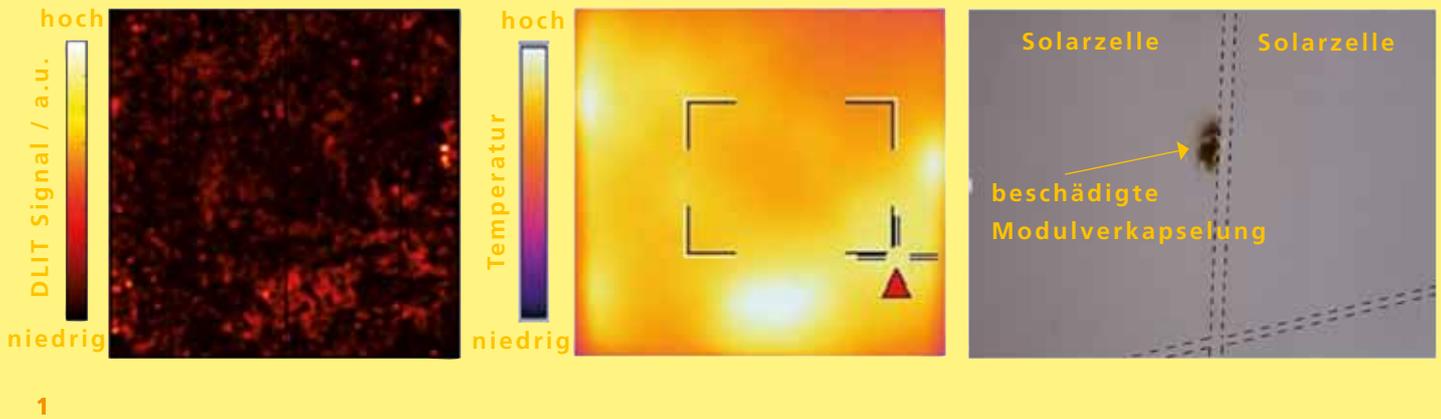
Lumineszenzbasierte und zugleich zeitabhängige Lebensdauermethoden, z. B. die quasistatische Lumineszenz, sind praktisch unabhängig von sämtlichen genannten Artefakten.

1 Die Verteilung der Rekombinationsverluste in Silicium kann mit Hilfe von Photolumineszenzbildern sehr schnell qualitativ erfasst werden. Mit unserem neuen QSSPL-Messaufbau (Mitte) können wir einen Teilbereich eines PL-Bildes (links) kalibrieren und so die ortsaufgelöste Verteilung des zentralen Parameters Ladungsträgerlebensdauer abbilden.

Am Fraunhofer ISE wurde die quasistatische Lumineszenz deshalb zu einer in der Silicium-Photovoltaik breit einsetzbaren Methode weiterentwickelt. Bisherige Meilensteine dieser Entwicklung sind:

- Entwicklung einer dotierungsunabhängigen Methode zur Lebensdauerbestimmung
- Absenkung der unteren Grenze zuverlässig messbarer Ladungsträgerlebensdauern auf $\sim 1 \mu\text{s}$ (bei üblicher Dotierung)
- Möglichkeit der ortsaufgelösten Lebensdauerkalibrierung durch Kombination von statischem PL-Image (CCD) und quasistatischer Lumineszenzmessung
- Erweiterung des Spektrums messbarer Proben auf Solarzellen und metallisierte Wafer
- Möglichkeit der injektionsabhängigen Lebensdauerermessung über einen Injektionsbereich von deutlich unter 10^{10} cm^{-3} bis zu einem Bestrahlungsäquivalent von ~ 50 Sonnen
- Entwicklung einer eigenständigen Mess- und Auswertungssoftware

Die Arbeiten werden von der Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen des Projekts »Silicon BEACON« unterstützt.



DURCHBRÜCHE IN MODULEN AUS MULTIKRISTALLINEN SILICIUMSOLARZELLEN

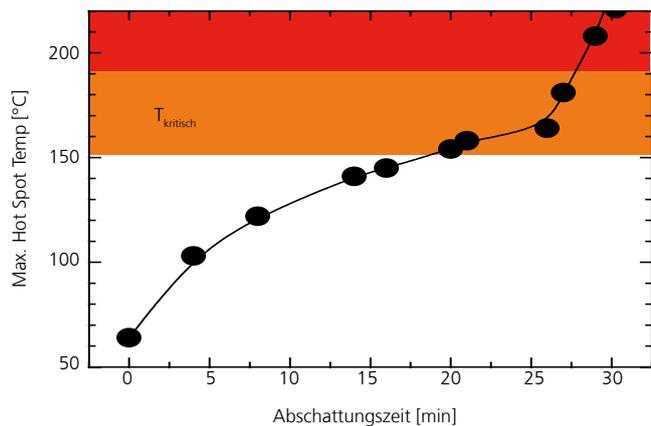
Hot Spots sind eine der häufigsten Ursachen für Schäden an installierten PV-Modulen. Mögliche Ursache für Hot Spots sind Dioden-Durchbrüche in Solarzellen aus multikristallinem (mc) Silicium. Vorbehalte gegenüber den Auswirkungen dieser Durchbrüche auf die Modulzuverlässigkeit sind eines der Haupthindernisse für den industriellen Einsatz von prinzipiell kostengünstigerem Upgraded Metallurgical Grade (UMG) Silicium. Am Fraunhofer ISE konnte gezeigt werden, dass eine gleichmäßige Verteilung der Durchbrüche über die Zellfläche nicht zu Hot Spots im Modul führt, sondern sich sogar positiv auf die Moduleigenschaften auswirken kann.

Fabian Fertig, Stefan Rein, Ralf Preu

Werden Teile von Solarmodulen im laufenden Betrieb verschattet (z. B. durch Laub oder Schnee), verbrauchen diese Leistung anstatt Leistung zu generieren. Dies ist dadurch bedingt, dass eine verschattete Zelle durch die nichtverschatteten Zellen im Modul spannungsmäßig umgepolt wird. Weisen Solarzellen lokale Defekte auf, die zu einer lokalen Erhöhung des Stromflusses bei Betrieb in Sperrrichtung führen, so können bei Betrieb unter Verschattung im Modul die lokale Leistungsaufnahme und die daraus resultierende Temperaturerhöhung an diesen Stellen einen kritischen Grenzwert überschreiten. Die Folge ist eine irreversible Beschädigung des Moduls aufgrund eines durch zellspezifische Eigenschaften entstehenden »Hot Spots« (Abb. 1/2).

Am Fraunhofer ISE untersuchen wir, unter welchen Umständen Dioden-Durchbrüche in Solarzellen aus mc-Silicium zu Hot Spots führen. Dabei hat sich gezeigt, dass die absolute Wärmeentwicklung keine kritische Temperatur erreichen muss, solange die Durchbrüche flächig über die Solarzelle verteilt sind. Eine frühere Durchbruchspannung wie bei Solarzellen aus UMG-Silicium erweist sich dabei als besonders

1 Dunkel-Thermographie (DLIT) Aufnahme einer mc-Si Solarzelle bei Betrieb unter Sperrrichtung vor der Modulintegration (links), Wärmebild dieser Solarzelle unter Vollverschattung im Modul (Mitte) und Aufnahme eines durch einen Hot Spot beschädigten Modul-Backsheets (rechts).

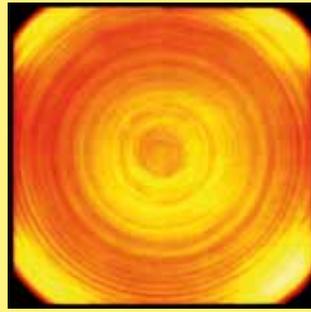
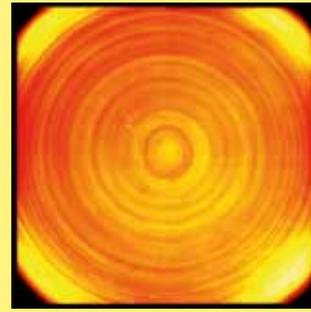
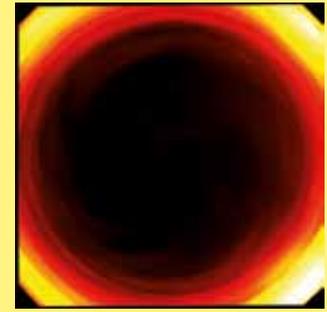


2 Verlauf der maximalen Hot Spot Temperatur einer kritischen Zelle bei andauernder Verschattung. Die kritische Temperatur, ab der ein Modul irreversibel beschädigt wird, liegt üblicherweise im Bereich 150–190 °C und hängt vom Modulverkapselungsmaterial sowie äußeren Einflüssen (z. B. Wind) ab.

vorteilhaft, da die im schlimmsten Fall auftretende absolute Leistungsdissipation geringer ausfällt als bei Solarzellen mit höherer Durchbruchspannung und gleichzeitig eine höhere Leistungsausbeute bei verschatteten Modulen möglich ist.

Parallel zu den experimentellen Untersuchungen werden die Vorgänge in Modul und Zelle am Fraunhofer ISE auch theoretisch modelliert und Messmethoden zur Inline-Detektion und Bewertung von Defekten in Siliciumsolarzellen entwickelt.

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

$\eta = 18,4 \%$  $\eta = 14,4 \%$  $\eta = 18,3 \%$  $\eta = 18,3 \%$ 

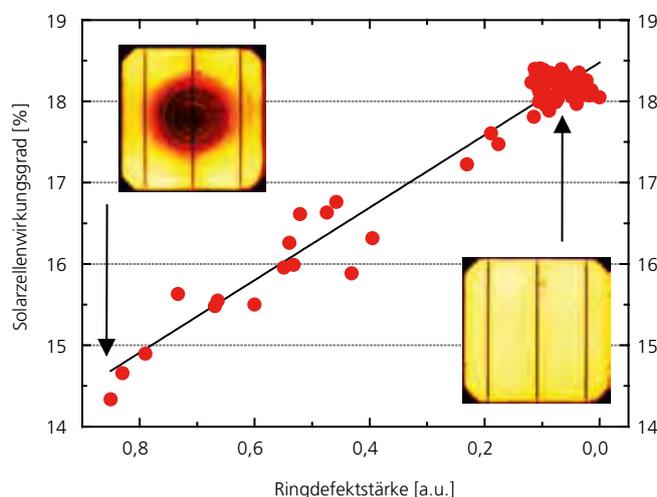
1

QUALITÄTSKONTROLLE VON CZOCHRALSKI SILICIUMWAFERN

Im Hinblick auf hocheffiziente Solarzellenkonzepte gewinnt die Qualitätskontrolle des Siliciumwafers im Eingangstest der Fertigung einen immer größeren Stellenwert. In einer aktuellen Materialstudie wurden in hochwertigen Czochralski (Cz) Siliciumwafern mit Hilfe von Photolumineszenz (PL) hochrekombinationsaktive Materialdefekte nachgewiesen, die die Effizienz der Solarzellen von 18,5 % auf bis zu 14,4 % reduzieren. Das neue Verfahren wird derzeit für den Einsatz im Wafereingangstest weiter entwickelt.

Juliane Broisch, Teodora Chipei, Jonas Haunschild,
Stefan Rein, Isolde Reis, Ralf Preu

Etwa die Hälfte aller kristallinen Siliciumsolarzellen wird aus monokristallinem Czochralski (Cz) Silicium hergestellt. Aufgrund der hohen Materialqualität ist dieses Material insbesondere auch für neuartige hocheffiziente Solarzellenkonzepte interessant. Wegen der sinkenden Toleranz dieser Solarzellenkonzepte für Schwankungen in der Materialqualität gewinnt deren Kontrolle zunehmend an Bedeutung.



1 PL-Aufnahmen von Cz-Siliciumwafern im as-cut Stadium mit den in der fertigen Solarzelle erreichten Wirkungsgraden. Wafer mit unterschiedlichen Typen von Ringdefekten, von denen zwei harmlos sind und einer stark wirkungsgradlimitierend wirkt.

Um Informationen über das Spektrum der in industriellem Cz-Silicium tatsächlich auftretenden Defekte zu erhalten und deren Einfluss auf die Leistungsdaten der Solarzellen zu ermitteln, wurde am Fraunhofer ISE eine breit angelegte Materialuntersuchung durchgeführt, in der aus einer großen Bandbreite von Standard Cz-Siliciumwafern verschiedener Hersteller Standardsolarzellen hergestellt wurden. Wie in Abb. 2 zu sehen, variiert der Solarzellenwirkungsgrad in einem sehr breiten Bereich von 14,4–18,5 %. Die PL-Analyse der Solarzellen zeigt, dass die niedrigen Wirkungsgrade durch ringartige Defektstrukturen verursacht werden, die hochrekombinationsaktiv sind und daher im PL-Bild dunkel erscheinen. Aus den PL-Bildern der Solarzellen wurde als neue Materialkenngröße die sogenannte Ringdefektstärke ermittelt, mit welcher der Wirkungsgrad linear korreliert (Abb. 2).

Da Wirkungsgradverluste von bis zu 4 % (absolut) in der industriellen Produktion nicht tolerabel sind, müssen kritische Wafer frühzeitig identifiziert und aussortiert werden. Nach Emitterdiffusion ist dies mittels PL bereits zuverlässig möglich. Wie die Bildserie in Abb. 1 zeigt, können Ringdefekte unterschiedlicher Ausprägung auch schon im as-cut Stadium mittels PL nachgewiesen werden.

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

2 Solarzelleneffizienz als Funktion der Ringdefektstärke, die mittels PL-Imaging an der fertigen Solarzelle bestimmt wurde. Exemplarisch sind zwei PL-Bilder eingebildet.



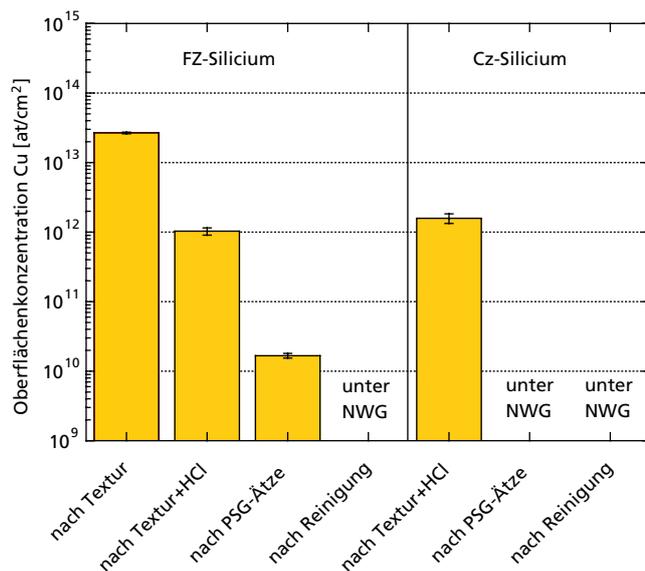
OBERFLÄCHENREINIGUNG UND -CHARAKTERISIERUNG

Der Oberflächenreinigung kommt eine Schlüsselrolle im Hinblick auf die industrielle Umsetzbarkeit von hocheffizienten Solarzellenkonzepten zu. Bei der Entwicklung geeigneter, kostengünstiger nasschemischer Reinigungssequenzen müssen zur Prozessbewertung geeignete Charakterisierungsmethoden für die exakte Bestimmung von metallischer oder organischer Restkontamination an der Silicioberfläche zur Verfügung stehen. Mit Hilfe dieser Methoden können Reinigungssequenzen hinsichtlich Dauer und Einsatz der Chemikalien optimiert und somit kostengünstiger gestaltet, aber auch regelmäßige Prüfungen zur Qualitätssicherung durchgeführt werden.

Katrin Birmann, Anamaria Moldovan, Antje Oltersdorf, **Jochen Rentsch**, Christian Sonner, Martin Zimmer, Ralf Preu

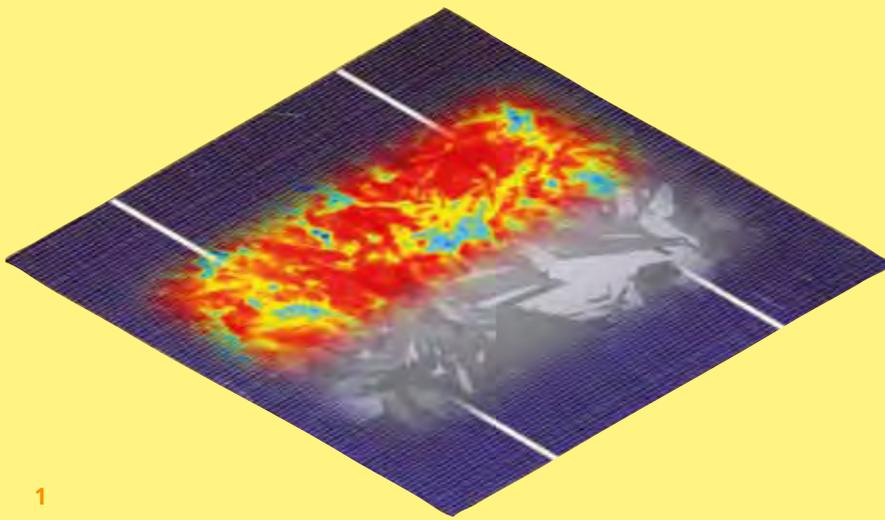
Am Fraunhofer ISE werden innovative und auf die Bedürfnisse der Photovoltaikindustrie angepasste Reinigungsprozesse für Si-Oberflächen entwickelt. Insbesondere aus der Halbleiterindustrie bekannte, teilweise sehr aufwändige Sequenzen sollen verkürzt und teure Verbrauchsmaterialien wie etwa Wasserstoffperoxid ersetzt werden. Zur Bewertung der Qualität bzw. der Effektivität der angewandten Reinigung mussten zunächst Methoden zur Spurenanalytik metallischer und organischer Verunreinigungen entwickelt werden. Beim sogenannten Droplet Surface Etching (DSE) sammelt ein Flüssigkeitstropfen bestehend aus Flusssäure und Wasserstoffperoxid die an der Waferoberfläche angelagerten Verunreinigungen ein. Anschließend kann dieser Tropfen mittels Massenspektroskopie, Atomabsorptions- oder optischer Emissionsspektroskopie analysiert und daraus die Oberflächenkonzentration der für die Solarzelle besonders kritischen metallischen Verunreinigungen (Cu, Fe, Ni, Cr etc.) mit einer Nachweisgrenze von ca. $1 \cdot 10^9$ Atomen/cm² ermittelt werden.

- 1 Ätzen der oberflächennahen Si-Schicht mittels eines Flüssigkeitstropfens bestehend aus Flusssäure und Wasserstoffperoxid (Droplet Surface Etching).
- 2 Optische Emissions- sowie Atomabsorptionsspektroskopie-Messapparaturen zur Bestimmung metallischer Verunreinigungen in nasschemischen Lösungen.



- 3 Mittels ICP-Massenspektroskopie ermittelte Oberflächenkontamination eines Floatzone- (FZ) bzw. Czochralski (Cz)-gezogenen Siliciumwafers mit Kupfer (Cu) nach unterschiedlichen Teilschritten einer Nachreinigung nach alkalischer Textur (HCl: Salzsäurebad, NWG: Nachweisgrenze, PSG: Phosphorsilikatglas).

Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und die Projektpartner Stangl Semiconductor AG, Heraeus Noblelight GmbH, Roth&Rau AG, Astex GmbH und LayTec GmbH gefördert.



1

VORHERSAGE DER SOLARZELLENPARAMETER AUS LEBENSDAUERMESSTUNGEN

Für multikristallines Silicium ist die zentrale Frage bei der Materialcharakterisierung, welchen Einfluss die elektrische Materialqualität auf den Wirkungsgrad der Solarzelle hat. Üblicherweise wird zur Charakterisierung der elektrischen Materialqualität die Lebensdauer der Ladungsträger, z. B. Elektronen für bordotiertes Material, gemessen. Wir haben die Lebensdauer bei verschiedenen Ladungsträgerdichten gemessen und mit einer Simulation kombiniert. Dies ermöglicht uns eine quantitative Vorhersage des Zellwirkungsgrads und darüber hinaus eine detaillierte Analyse der materialbedingten Verluste aller Solarzellenparameter.

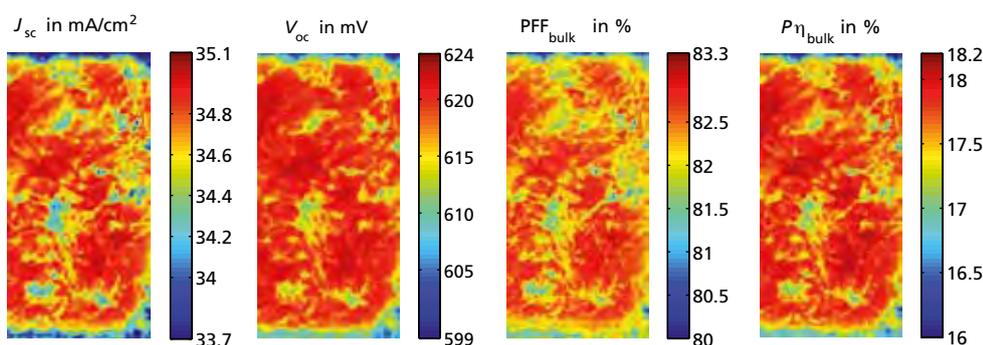
Johannes Giesecke, Martin Hermle, **Bernhard Michl**,
Marc Rüdiger, Martin Schubert, Wilhelm Warta, Stefan Glunz

Zur Vorhersage von Zellparametern aus Lebensdauerermessungen wurde das Verfahren des Photolumineszenz-Imaging (PLI) weiter entwickelt, um auch in Gebieten niedriger Lebensdauer zuverlässige Werte bestimmen zu können. Die Materialqualität wird mit dem orts aufgelösten und injektionsabhängigen Verfahren an einem Wafer nach den relevanten Hochtemperaturschritten sowie mit geeigneter Oberflächenpassivierung bestimmt und ermöglicht damit einen direkten Zugang zu den für die Zelleffizienz relevanten Materialinformationen. So kann

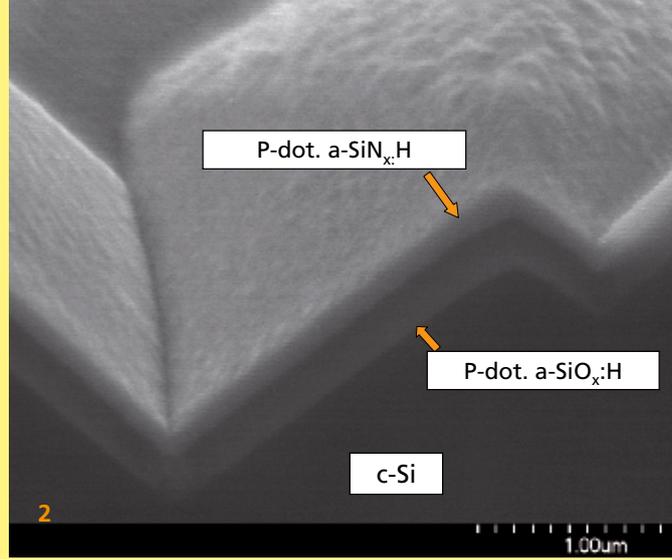
1 Solarzelle, Si-Material und ein Bild der Solarzelleneffizienz (Collage).

berücksichtigt werden, dass die Ladungsträgerdichte auch in der Solarzelle wesentlich vom Betriebszustand (Kurzschluss bis zum Leerlaufbetrieb) und vom Zellkonzept abhängig ist. Nun können mit Hilfe einer Simulation für jeden Bildpunkt der PLI-Messung, die lokalen Zellparameter errechnet werden (Abb. 2). Es zeigt sich, dass die lokale Zelleffizienz in Gebieten mit hoher Versetzungsdichte um bis zu 2 %_{abs} erniedrigt ist. Den größten Einfluss hat die elektrische Qualität auf den Kurzschlussstrom J_{sc} . Dies liegt an den im Vergleich zum Leerlaufbetrieb signifikant reduzierten Ladungsträgerlebensdauern im Kurzschlussbetrieb. Außerdem sieht man, dass der Füllfaktor durch die Materialqualität erniedrigt wird. Dieses Ergebnis ist direkte Folge der mit der Injektion variierenden Lebensdauer. Mithilfe eines speziellen Mittelungsverfahrens können auch globale Solarzellenparameter errechnet werden. Diese globalen Werte stimmen sehr gut mit an prozessierten Solarzellen gemessenen überein und erlauben eine detaillierte materialbedingte Verlustanalyse auf Zellniveau.

Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und im Rahmen des Projekts »ALBA II« unterstützt.



2 Ortsaufgelöste Analyse der Kurzschlussstromdichte J_{sc} , der Leerlaufspannung V_{oc} , des Füllfaktors PFF_{bulk} und der resultierenden Zelleffizienz $P\eta_{bulk}$. Alle Bilder sind in gleicher Weise skaliert, das Maximum ist der Wert, den man ohne Materialverluste erreichen könnte, das Minimum ist ein Verlust von 4 % (beim Effizienzbild von 12 %).



FUNKTIONALE PECVD SCHICHTSYSTEME

Bei kristallinen Siliciumsolarzellen sind PECVD Schichten zur vorderseitigen Antireflexbeschichtung bzw. zur Passivierung der Oberflächen derzeitiger Stand der Technik. Im Hinblick auf weitere Kosteneinsparungspotenziale wurden am Fraunhofer ISE multifunktionale PECVD Schichtsysteme entwickelt, die mehrere Aufgaben gleichzeitig erfüllen können. So dienen diese außer zur Passivierung der Oberfläche z. B. auch als Dotierstoffquelle oder als Diffusionsbarriere. Mit Hilfe dieser Schichtsysteme können somit in Zukunft komplexe Prozessabfolgen signifikant vereinfacht werden.

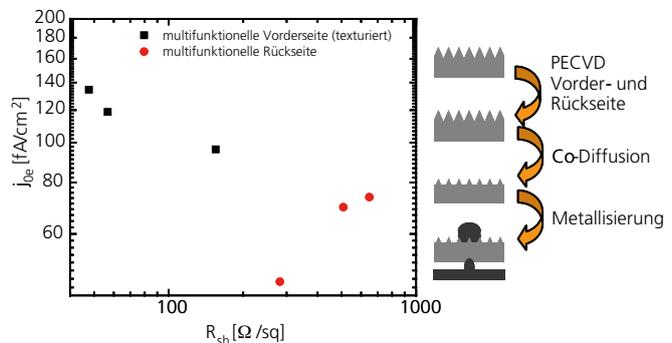
Marc Hofmann, Jan Jeurink, Bishal Kafle, Roman Keding, Norbert Kohn, Saskia Kühnhold*, Florian Pillath, **Jochen Rentsch**, Pierre Saint-Cast, Johannes Seiffe*, Daniel Trogus, Dirk Wagenmann, Ralf Preu

*Freiburger Materialforschungszentrum FMF, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Mit Hilfe von im PECVD Verfahren abgeschiedenen dotierten Siliciumdioxidschichten konnte bereits in der Vergangenheit gezeigt werden, dass sehr homogene Emitter auch auf stark texturierten Oberflächen erzeugt werden können. In neueren Untersuchungen am Fraunhofer ISE wird nun zusätzlich auf die dotierte Schicht noch eine Passivierungsschicht (z. B. SiN_x oder AlO_x) abgeschieden. Ein solches multifunktionales Schichtsystem dient somit sowohl der einseitigen Emitterbildung als auch der Oberflächenpassivierung. Es konnte beobachtet werden, dass durch den Hochtemperaturschritt gleichzeitig die Porosität der Passivierungsschicht verringert wird, wodurch Vorteile für eine später galvanisch erzeugte Kontakterzeugung geschaffen werden. Durch die sequenzielle Beschichtung der Vorder- und Rückseite einer Solarzelle mit gegensätzlich dotierten Passivierungs- bzw. Dotierschichten und anschließender Co-Diffusion konnten bislang Emittersättigungsstromdichten

1 Mikrowellen-Linearplasmaanregung einer PECVD Durchlaufanlage zur Abscheidung der dotierten Passivierungs- und Dotierschichten. Die homogene Plasmabreite beträgt ca. 1 m, womit Carrier mit bis zu 5 x 5 Wafern mit 156 mm Kantenlänge parallel prozessiert werden können.

2 Mittels PECVD Verfahren abgeschiedene dotierte $\text{a-SiN}_x\text{:H}$ und $\text{a-SiO}_x\text{:H}$ Schichten auf alkalisch texturierter Pyramidenoberfläche.



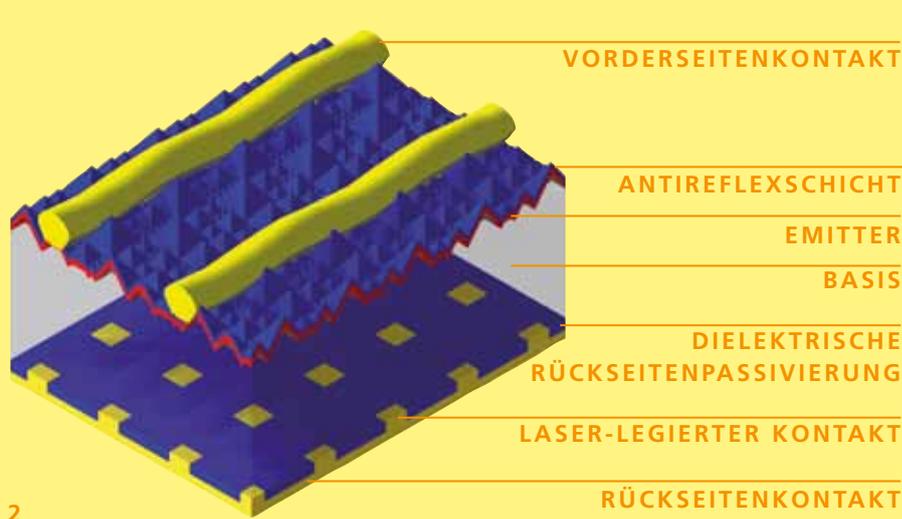
3 Resultierende Emittersättigungsstromdichten j_{0e} und Emitterschichtwiderstände R_{sh} nach Co-Diffusion aus dotierten PECVD Schichtsystemen für die Vorder- und Rückseite der Solarzelle.

unterhalb $100 \text{ fA}/\text{cm}^2$ für den vorderseitigen Emitter bzw. unterhalb $20 \text{ fA}/\text{cm}^2$ für ein rückseitiges Bor-Back-Surface-Field auf p-dotierten, texturierten Ausgangssubstraten erreicht werden. Zukünftige Prozessabläufe zur Herstellung beidseitig passivierter und lokal kontaktierter Solarzellenstrukturen können somit signifikant vereinfacht werden.

Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.



1



2

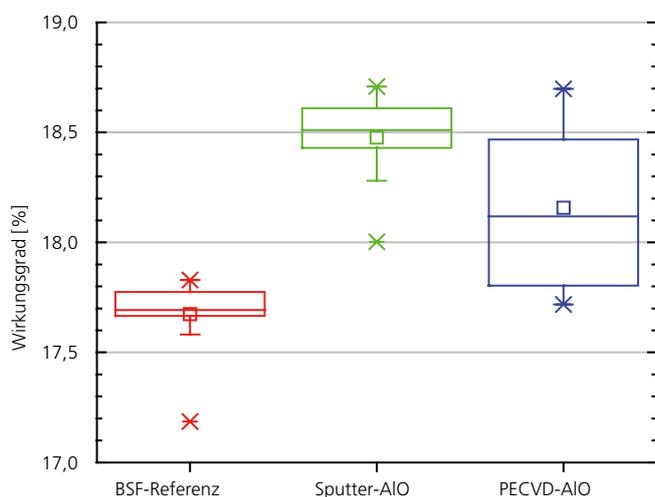
GESPUTTERTES ALUMINIUMOXID ZUR PASSIVIERUNG VON SOLARZELLEN

Eine gute Passivierung der Solarzellenoberflächen ist entscheidend, um höhere Wirkungsgrade zu erzielen, und daher industriell von großem Interesse. Für p-dotierte Siliciumwafer und für p-Typ Emitter sind Beschichtungen mit Aluminiumoxid hervorragend geeignet. Die Sputtertechnologie ist eine Methode zur Abscheidung von Aluminiumoxidschichten, welche die Möglichkeit zur Kostensenkung dieses Produktionsschrittes bietet. Mit dem Verfahren konnten hohe Wirkungsgrade von über 18,7 % erzielt werden.

1 Sputteranlage ATON500 von Applied Materials am Fraunhofer ISE.

2 Rückseitenpassivierte Solarzelle mit laser-legierten Kontakten (Schema): Zwischen der ganzflächigen Rückseitenmetallisierung (gelb) und der Basis befindet sich eine zusätzliche Passivierungsschicht (blau) aus Aluminiumoxid mit einer Siliciumnitrid-Deckschicht, um die Anzahl der Rekombinationen zu reduzieren und damit höhere Wirkungsgrade zu ermöglichen.

Georg Krugel, Winfried Wolke, Ralf Preu

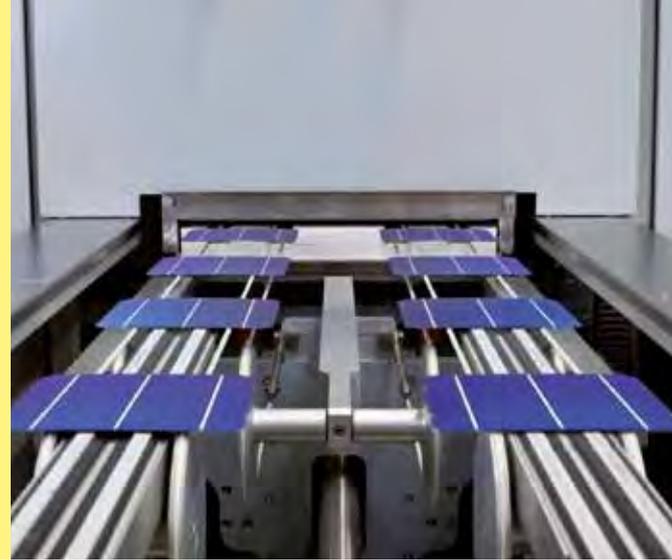


3 Der Wirkungsgrad der p-Typ Solarzellen mit gesputterter Rückseitenpassivierung aus Aluminiumoxid liegt höher als bei den BSF-Referenzzellen mit ganzflächigem Rückseitenkontakt und sogar über dem Wirkungsgrad der Solarzellen mit PECVD-Aluminiumoxid.

Solarzellen mit passivierter Rückseite sind ein bereits etabliertes Konzept für das Erreichen hoher Wirkungsgrade. Die Abscheidung der Rückseitenpassivierung ist dabei ein wichtiger Prozessschritt, der noch Kostensenkungspotenzial besitzt und bei dem höhere Durchsätze wünschenswert sind.

Als vielversprechende Alternative zum bislang eingesetzten ALD- (Atomic Layer Deposition) und PECVD-Verfahren (Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition) haben wir am Fraunhofer ISE die Sputtertechnologie zur Abscheidung von Aluminiumoxid entwickelt (Abb. 1). Dabei kann z. B. auf die Verwendung des leichtentzündlichen und teuren Trimethylaluminium verzichtet werden.

Unter Verwendung der Sputtertechnologie zur Schichtabscheidung fertigten wir rückseitenpassivierte Solarzellen mit laser-legierten Kontakten (Abb. 2). Dabei konnten Wirkungsgrade über 18,7 % erzielt werden (Abb. 3). Es ist zu erwarten, dass eine Optimierung der Prozessparameter zu einer weiteren Erhöhung der Zellparameter führt.



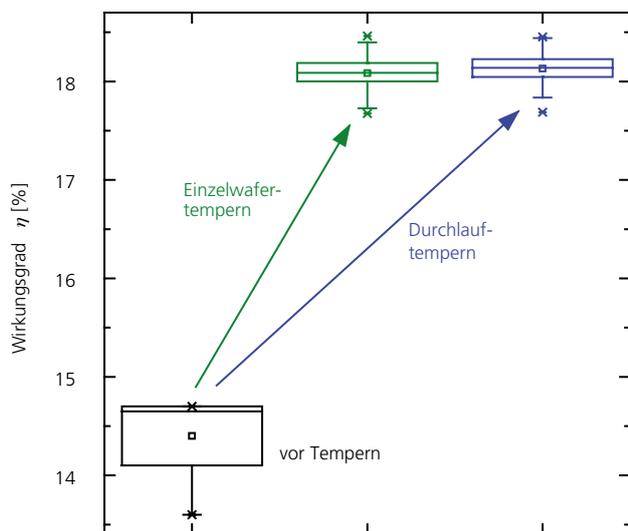
DURCHLAUFTEMPERN – HOHER DURCHSATZ UND KONTROLLIERTE ATMOSPHERE

Die meisten Hocheffizienzkonzepte für Siliciumsolarzellen weisen dielektrisch passivierte Oberflächen und/oder neuartige Metallisierungsansätze auf. Bei diesen Strukturen ist eine Temperaturbehandlung am Ende des Zellprozesses nützlich oder sogar zwingend notwendig, um hohe Effizienzen zu erreichen. Bisher werden für Temperprozesse meist kleinvolumige Quarzrohröfen eingesetzt. Diese bieten für industrielle Anwendungen jedoch nicht den nötigen Durchsatz, zudem ist eine Automatisierung aufwändig. Am Fraunhofer ISE wurde ein Durchlaufverfahren entwickelt, das Temperprozesse in kontrollierter Atmosphäre mit hohem Durchsatz ermöglicht und damit die Anforderungen industrieller Prozesse erfüllt.

Daniel Biro, **Sebastian Mack**, Daniel Scheffler, Andreas Wolf, Ralf Preu

Hocheffiziente Solarzellenkonzepte mit dielektrisch passivierten Oberflächen werden derzeit in die Produktion überführt. Viele dieser Passivierschichten benötigen eine Temperaturbehandlung zur Aktivierung der Passivierung. Ebenso erfordern alternative Metallisierungsverfahren, z. B. zweistufige Metallisierungen, einen Temperprozess, um die Adhäsion zu verbessern und den Übergangswiderstand zwischen Metall und Silicium zu reduzieren. In Zusammenarbeit mit dem Anlagenhersteller centrotherm photovoltaics haben wir am Fraunhofer ISE eine Prototypanlage zum Tempern im Durchlaufverfahren (Abb. 1) aufgebaut. Diese demonstriert erstmals das Tempern in kontrollierter Atmosphäre in einem durchsatzstarken Durchlaufprozess. Die bestehende Anlage ermöglicht einen Durchsatz von ca. 700 Wafern/h für Plateauzeiten von 2 min. Ein größeres System (fünf Spuren, längere Plateauzone) würde eine Steigerung auf über 3000 Wafer/h ermöglichen. Gasschleusen am Ein- und Auslauf des Ofens sorgen für eine effektive Trennung von Labor- und Prozessatmosphäre. Bei

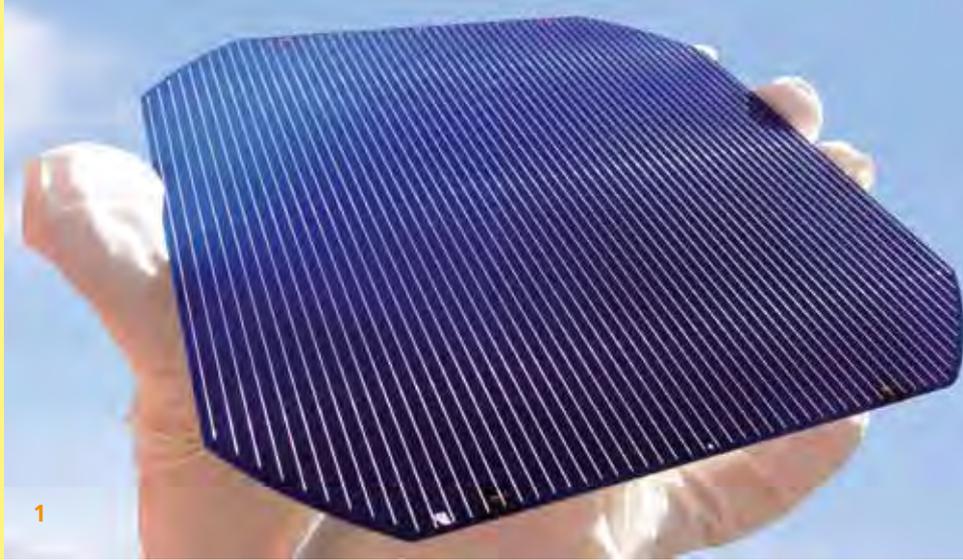
1 Prototyp des Durchlaufofens zum Tempern kristalliner Siliciumsolarzellen mit 125 mm oder 156 mm Kantenlänge. Der Ofen besitzt zwei Prozessspuren (Gesamtanlage links, Detailaufnahme rechts).



2 Wirkungsgradverteilung monokristalliner Siliciumsolarzellen mit passivierter Rückseite, gemessen vor und nach einem Temperprozess in Formiergas. Der Durchlaufprozess ist gleichwertig mit dem Einzelwaferprozess.

Verwendung von Formiergas kann dadurch eine Sauerstoffkonzentration von weniger als 1 ppm in der Prozesskammer erreicht werden. Zur Evaluierung des Prototypsystems wurden Prozesse unter identischen Bedingungen am Durchlaufofen sowie an einem Einzelwaferreaktor als Referenzsystem realisiert. Durch den Temperprozess steigt der Wirkungsgrad von Solarzellen mit dielektrisch passivierter Rückseite deutlich an (Abb. 2). Dabei erreicht das Durchlaufverfahren ein gegenüber dem Referenzsystem gleichwertiges Niveau.

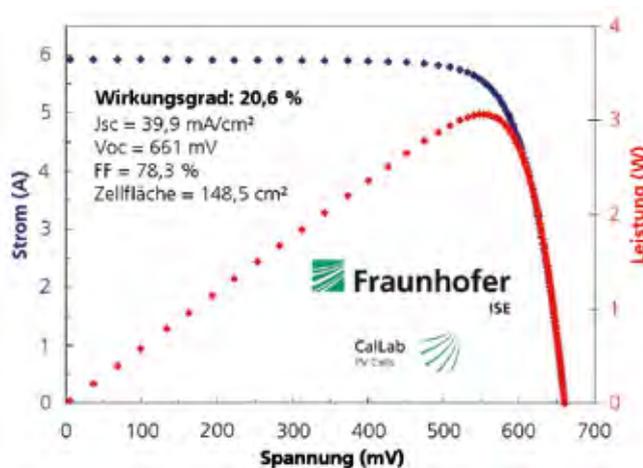
Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.



PASSIVIERTE MWT-SOLARZELLEN MIT DISPENSTEN VORDERSEITENKONTAKTEN

Passivierte Metal Wrap Through (MWT) Solarzellen vereinen die Vorteile einer Rückseitenkontaktsolarzelle mit denen der Oberflächenpassivierung in einem Solarzellentyp. Der zusätzliche Aufwand zur Herstellung dieser Solarzellen konnte auf einen einzigen Prozessschritt reduziert werden: das Laserbohren zur Erzeugung der Löcher für die Kontaktdurchführung. Mit Herstellungsprozessen, die auf industrieller Produktionstechnologie basieren, wurden mit Siebdruckmetallisierung Wirkungsgrade bis 20,2 % und mit dispenster Vorderseitenmetallisierung Rekordwirkungsgrade bis 20,6 % auf großflächigen monokristallinen p-Typ Siliciumwafern (Float-Zone, 125 x 125 mm²) erreicht.

Daniel Biro, Florian Clement, Harald Gentischer, Ulrich Jäger, **Elmar Lohmüller**, Sebastian Mack, Maximilian Pospischil, Jan Specht, Alma Spribille, Benjamin Thaidigsmann, Andreas Wolf, Ralf Preu

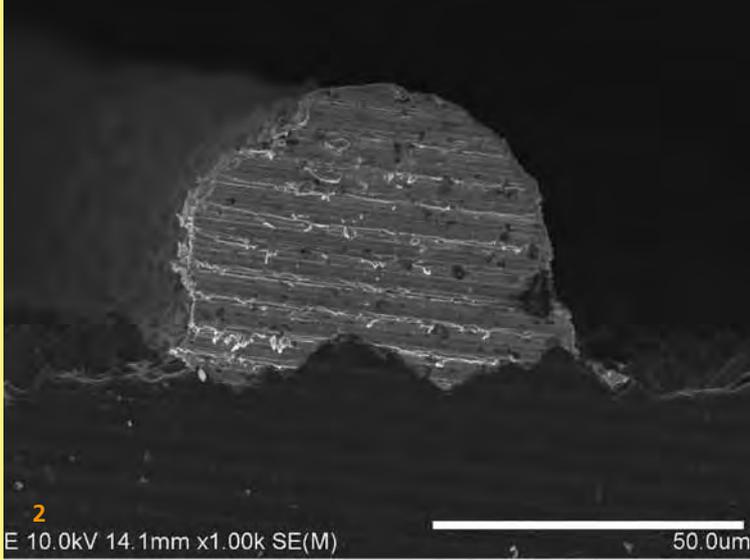


4 Strom- und Leistungskennlinie einer passivierten p-Typ MWT-Solarzelle mit dispensten Vorderseitenkontakten und einem Rekordwirkungsgrad von 20,6 % (bestätigt vom CalLab PV Cells am Fraunhofer ISE).

1 Vorderseite einer monokristallinen passivierten p-Typ MWT-Solarzelle mit Siebdruckmetallisierung. Drei Reihen an Durchkontaktierungen leiten den auf der Vorderseite eingesammelten Strom auf die rückseitig angeordneten externen elektrischen Kontakte.

Konventionelle industrielle Siliciumsolarzellen mit vollflächigem Aluminiumrückseitenkontakt stellen den meist verbreiteten Solarzellentyp in der PV-Industrie dar. Allerdings sind die Wirkungsgrade dieser Solarzellen vor allem durch hohe optische und elektrische Verluste auf der Solarzellenrückseite sowie hohe vorderseitige Oberflächenabschattung auf Grund des Kontaktgitters mit Stromsammelbussen limitiert.

Zur Erreichung höchster Wirkungsgrade im industriellen Umfeld entwickelten wir in unserem Photovoltaik-Technologie Evaluationscenter (PV-TEC) u. a. das HIP-MWT (High Performance-Metal Wrap Through) Solarzellenkonzept: Zur Minimierung der vorderseitigen Oberflächenabschattung um bis zu 50 %_{rel} werden die extern kontaktierbaren Stromsammelbusse von der Vorder- auf die Rückseite verlegt und mittels Kontaktdurchführungen (lasergebohrte Vias) elektrisch mit dem Vorderseitenkontaktgitter verbunden (Abb. 1/5). Zur Minimierung von optischen und elektrischen Verlusten werden die Solarzellenoberflächen zudem passiviert, was zu einer signifikanten Reduktion von Rekombinationsverlusten führt (PERC-Konzept: Passivated Emitter and Rear Cell). Im Gegensatz zu vergleichbaren, aber von der Herstellungssequenz aufwändigeren MWT-PERC-Solarzellen, konnten wir mit unseren neu entwickelten HIP-MWT-Solarzellen Prozessschritte für die Strukturierung des Emitters auf der Solarzellenrückseite einsparen (Abb. 5). Gegenüber dem Referenzprozess zur Herstellung von passivierten PERC-Solarzellen mit konventionellem Vorderseitenkontakt ist lediglich das Laserbohren zur Erzeugung von Löchern für die Kontaktdurchführung des Vorder- zum Rückseitenkontakt notwendig.

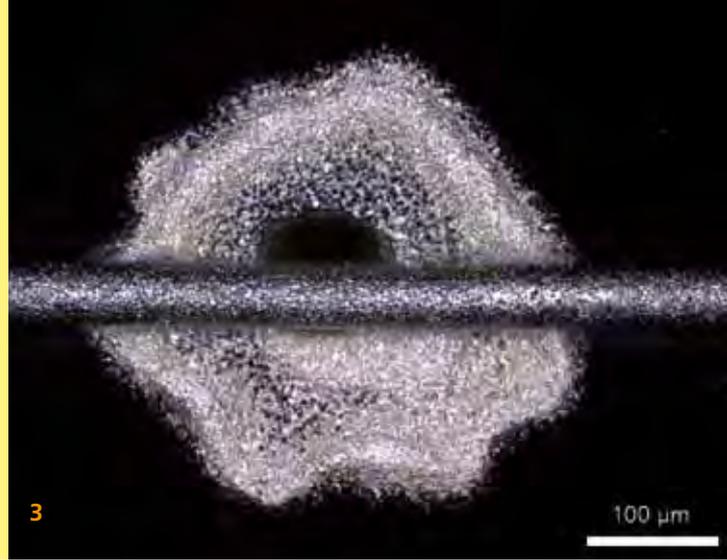


2 REM-Aufnahme eines dispersten Vorderseitenkontakts. Das Aspektverhältnis (Verhältnis von Höhe zu Breite) ist im Vergleich zu einem siebgedruckten Kontakt deutlich erhöht.

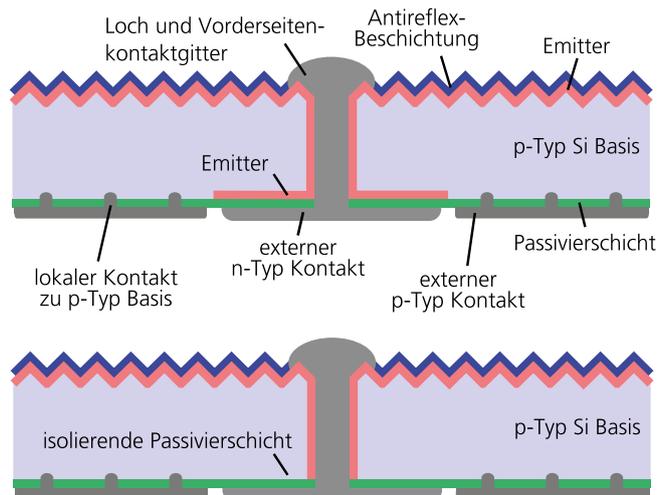
Basierend auf industriell etablierter Produktionstechnologie erreichen wir durch Verwendung laserdotierter selektiver Emitterstrukturen, einer dünnen thermischen Oxidschicht zur Emitterpassivierung und vollständiger Siebdruckmetallisierung von Vorder- und Rückseite Wirkungsgrade bis 19,6 % auf monokristallinem Czochralski (Cz) Silicium und 20,2 % auf hochwertigem Float-Zone (FZ) Silicium.

Darüber hinaus konnte mit Hilfe einer neuartigen Metallisierungstechnologie für die Solarzellenvorderseite (Dispenserverfahren, Abb. 2/3) die Herstellung einer großflächigen p-Typ Siliciumsolarzelle unter Verwendung von kostengünstigem Cz-Silicium mit einem Wirkungsgrad von über 20 % realisiert werden. Dies stellt einen sehr wichtigen Meilenstein für die fortschreitende Technologieentwicklung am Fraunhofer ISE dar. Die signifikante Wirkungsgradsteigerung ist hauptsächlich auf eine im Vergleich zur Siebdruckmetallisierung um bis zu 50 % reduzierte Kontaktfingerbreite auf der Vorderseite zurückzuführen. Parallelprozessierte und baugleiche Solarzellen mit hochwertigem p-Typ FZ-Silicium als Basismaterial erreichen einen Rekordwirkungsgrad von 20,6 % auf großer Zellfläche mit 125 mm Kantenlänge (Abb. 4).

Weitere Wirkungsgradsteigerungen werden durch Optimierungen der Prozesse und der Solarzellenstruktur im Rahmen aktuell laufender Arbeiten erwartet. Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), die Europäische Kommission und Industriepartner unterstützt.



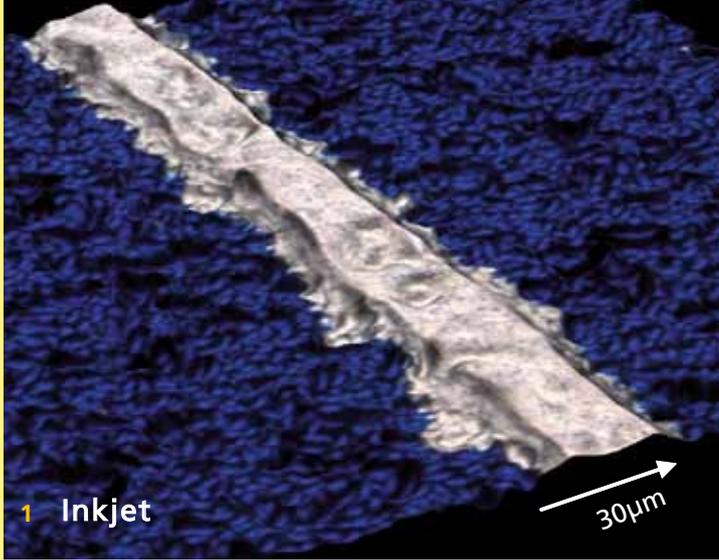
3 Lichtmikroskopaufnahme eines dispersten Vorderseitenkontakts im Bereich der Kontaktdurchführung. Der Umgriff der Lochmetallisierung auf die Vorderseite ist zu erkennen.



5 Schematische Querschnitte von passivierten MWT-Solarzellen: herkömmliches MWT-PERC-Konzept (oben), vereinfachtes HIP-MWT-Konzept (unten). Die HIP-MWT-Solarzelle weist keinen rückseitigen Emitterbereich auf.

Metallisierung	Material	Wirkungsgrad (%)
Siebdruck	Cz-Si	19,6
	FZ-Si	20,2
Dispenser	Cz-Si	20,1
	FZ-Si	20,6

6 Bisher erreichte Wirkungsgrade für passivierte MWT-Solarzellen. Die Kantenlänge der monokristallinen p-Typ Si-Wafer beträgt 125 mm, die Werte für Cz-Si beziehen sich auf Messungen nach Deaktivierung von Bor-Sauerstoff-Komplexen im Siliciumvolumen.



FEINLINIENDRUCK UND METALLPASTENENTWICKLUNG

Vorrangiges Ziel der Solarzellenentwicklung ist die Reduktion der photovoltaischen Energiegestehungskosten durch Verbesserung des Wirkungsgrads und Absenkung der Prozess- und Materialkosten. Eine vielversprechende Möglichkeit, diese Ziele zu erreichen, stellt die Optimierung der metallischen Leiterbahnen auf der Solarzellenvorderseite dar. Mittels Saatschichtdruck mit neuartigen Druckverfahren (Inkjet und Aerosoljet) in Kombination mit Galvanik zur Verstärkung dieser Saatschicht konnten wir schmalere, hochleitfähigere Solarzellenkontakte herstellen.

Sebastian Binder, Aleksander Filipovic, Markus Glatthaar, **André Kalio**, Katja Krüger, Johannes Spannagel, Daniel Schmidt, Stefan Glunz

Die Vorderseitenmetallisierung wird standardmäßig durch Siebdruck von Silberpasten erzeugt. Mit diesem Verfahren werden üblicherweise Fingerbreiten von ca. 100 µm erreicht, was zu einem relativ hohen Silberverbrauch und zu großer Abschattung der Solarzellenoberfläche führt.

Zur Optimierung des derzeitigen Verfahrens entwickeln wir neue Drucktechniken, die sich durch schmale Linienbreiten von etwa 35 µm und sehr gute Kontaktwiderstände zwischen Metall und Halbleiter auszeichnen. Nach dem Sintern der Tinte werden die Linien noch galvanisch mit einer Schichtfolge aus Nickel, Kupfer und Zinn verstärkt. So erhält man Leiterbahnen mit sehr hoher Leitfähigkeit, geringen Materialkosten und hoher Langzeitstabilität.

Wir verwenden hochauflösende Drucktechniken wie Aerosoljet und Inkjet. Beim Aerosol-Druck wird eine metallhaltige Tinte zu einem Aerosol zerstäubt und durch einen Jet mit einem umschließenden Hüllgas auf die Solarzelle fokussiert. Derzeit wird ein Demonstrator dieser Technologie für die

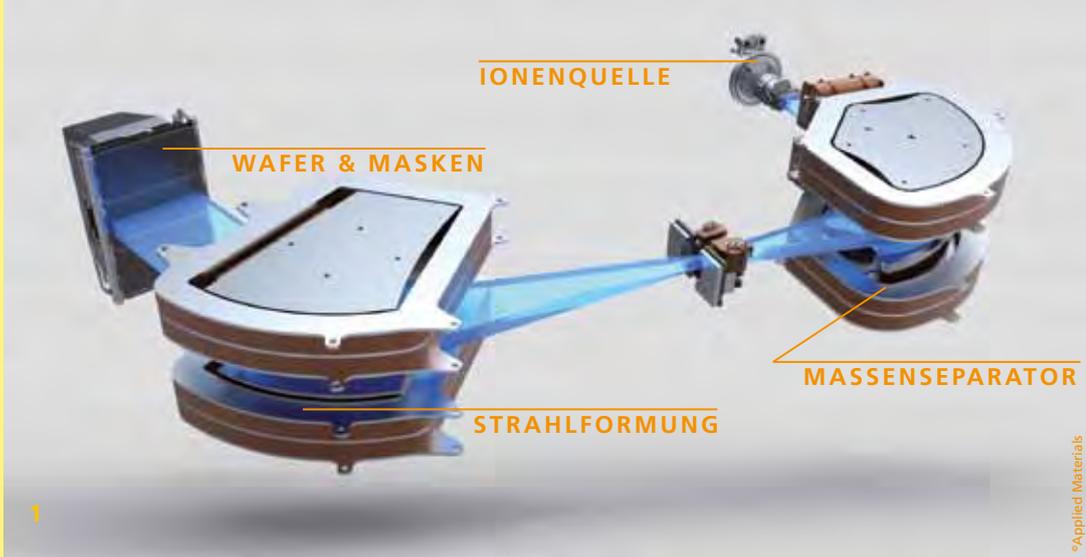
1 Saatschichtleiterbahn, die mit Inkjet gedruckt wurde.

2 Dreiwalzwerk zum Homogenisieren und Dispergieren von Pasten.

Produktion mit hohem Durchsatz entwickelt. Beim Inkjet-Druck wird aus einem Array von Jets mit ca. 25 µm Durchmesser tröpfchenweise Tinte auf den Wafer aufgetragen. Aus diesen Tröpfchen kann dann entweder eine Saatschicht oder eine vollständige Leiterbahn geformt werden.

Da Tinte und Drucktechnik eine Einheit bilden, entwickeln wir außerdem Tinten und Pasten für die Metallisierung von Bor- und Phosphor-Emittern. Wir können dabei sowohl die für die Pasten notwendigen Komponenten, z. B. Gläser, selbst herstellen als auch die Mischung der Pasten und Tinten vollständig durchführen. Eine Anforderung für Hocheffizienzsolarzellen ist die Kontaktierung niedrig dotierter Emittter. Derzeit ist es mit den von uns entwickelten Tinten möglich, Emittter mit einer Oberflächenkonzentration bis zu $N_D = 8 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ zu kontaktieren, was ein sehr hohes Wirkungsgradpotenzial ermöglicht.

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



HOCHEFFIZIENTE SILICIUMSOLARZELLEN MIT IONENIMPLANTATION

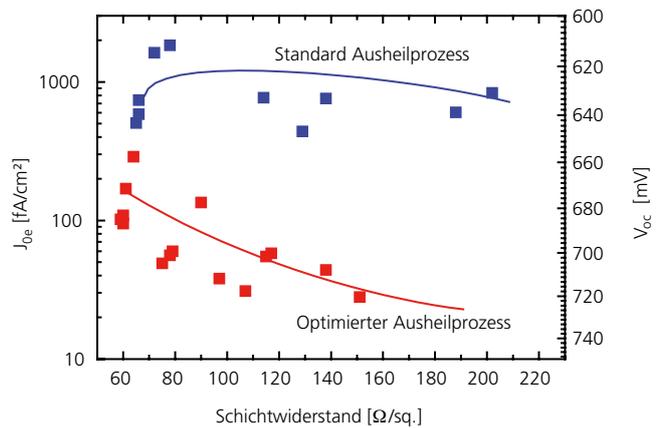
Ionenimplantation ist in der Mikroelektronik die Standardtechnologie zur Erzeugung lokaler Dotierungen. Da viele hocheffiziente Solarzellenkonzepte lokale Dotierungen benötigen, ist die Ionenimplantation auch für die Photovoltaik eine sehr interessante Prozesstechnologie. In Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma für Ionenimplanter VSEA ist es uns erstmals gelungen, eine vollständig implantierte Rückseitenkontaktsolarzelle (RSK) mit einem Wirkungsgrad von 20 % herzustellen. Durch die Optimierung des für implantierte Zellen notwendigen thermischen Ausheilschritts konnten wir für eine beidseitig kontaktierte Zellstruktur einen Wirkungsgrad von 21,7 % erreichen, was weltweit den höchsten Wirkungsgrad für eine implantierte Solarzelle darstellt.

Nicholas Bateman*, Jan Benick, Martin Hermle, Nikolas König, Antonio Leimenstoll, Christian Reichel, Sonja Seitz, Felix Schätzle, Stefan Glunz

*Varian Semiconductor Equipment Associates

Lokale Dotierprofile sind für viele hocheffiziente Siliciumsolarzellenkonzepte eine wichtige Voraussetzung. Hierfür sind bei Verwendung von klassischen Rohrofendiffusionen meist mehrere Prozessschritte nötig, z. B. das Aufbringen und die Strukturierung einer Diffusionsbarriere. Im Gegensatz dazu lassen sich bei der Ionenimplantation Schattenmasken verwenden und so lokale Dotierprofile in einem Prozessschritt realisieren. Dadurch reduziert sich die Anzahl der Prozessschritte vor allem bei komplexeren Strukturen, z. B. rückseitig sammelnden und kontaktierten (RSK) Solarzellen, erheblich. In Zusammenarbeit mit der Firma Varian ist es uns gelungen, die erste vollständig implantierte RSK Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 20 % zu realisieren.

1 Prinzip der lokalen Dotierung mittels Ionenimplantation.

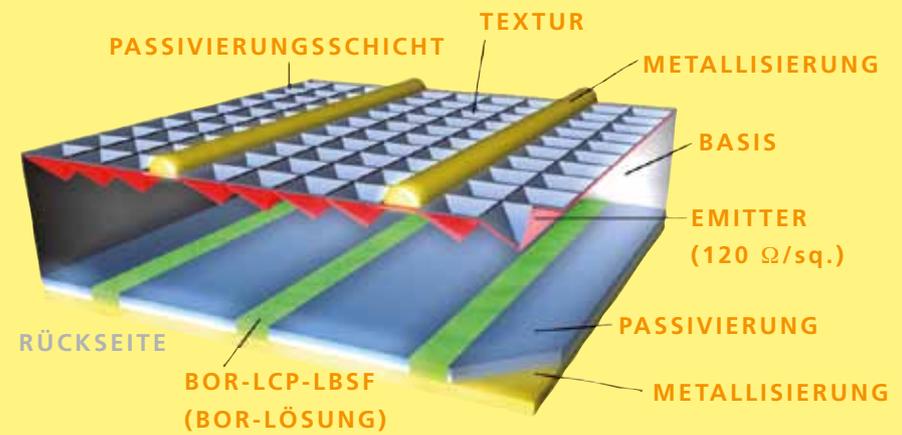


2 Einfluss des Ausheilprozesses auf die Qualität des implantierten Bor-Emitters (Linien sind guides-to-the-eyes).

Da durch den Ionenbeschuss während der Implantation eine Kristallschädigung erfolgt, muss diese in einem nachfolgenden Hochtemperaturschritt ausgeheilt werden. Hierzu entwickeln wir optimierte Prozesse und Prozessfolgen, die neben dem Ausheilen eine simultane Passivierung der Oberfläche ermöglichen. Unter Verwendung dieser optimierten Prozesse konnten wir Bor- und Phosphordotierte Emitter mit sehr geringen Dunkelsättigungsströmen realisieren (Abb. 2). n-Typ Solarzellen mit einem implantierten Bor-Emitter (hergestellt mittels optimiertem Ausheilprozess) erreichten in der Spitze einen Wirkungsgrad von 21,7 % – weltweit der höchste Wirkungsgrad einer implantierten Solarzelle.



VORDERSEITE

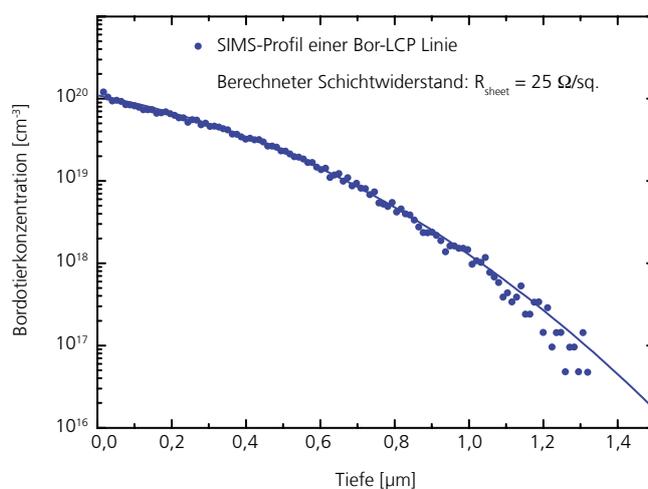


2

LOKALE BORDOTIERUNGEN FÜR HOCH-EFFIZIENTE SILICIUMSOLARZELLEN

Trotz erfolgreicher Prozessoptimierungen stoßen heutige Industriesolarzellen auf strukturbedingte Wirkungsgradbegrenzungen, die u. a. durch den vollflächigen Metallkontakt auf der Rückseite der Solarzellen hervorgerufen werden. Um diese Grenzen zu überwinden, ist ein wesentlicher Bestandteil die Einführung einer passivierten Rückseite, die nur lokale hochdotierte Kontakte besitzt. Laser Chemical Processing (LCP) ist ein Verfahren, bei dem ein flüssigkeitsstrahlgeführter Laser dazu verwendet wird, Passivierungsschichten lokal zu öffnen und gleichzeitig – je nach Flüssigkeit – lokale Bor- oder Phosphordotierungen zu erzeugen.

Christoph Fleischmann, Markus Glatthaar, Sybille Hopman, **Sven Kluska**, Martin Lieder, Matthias Mesec, Stefan Glunz



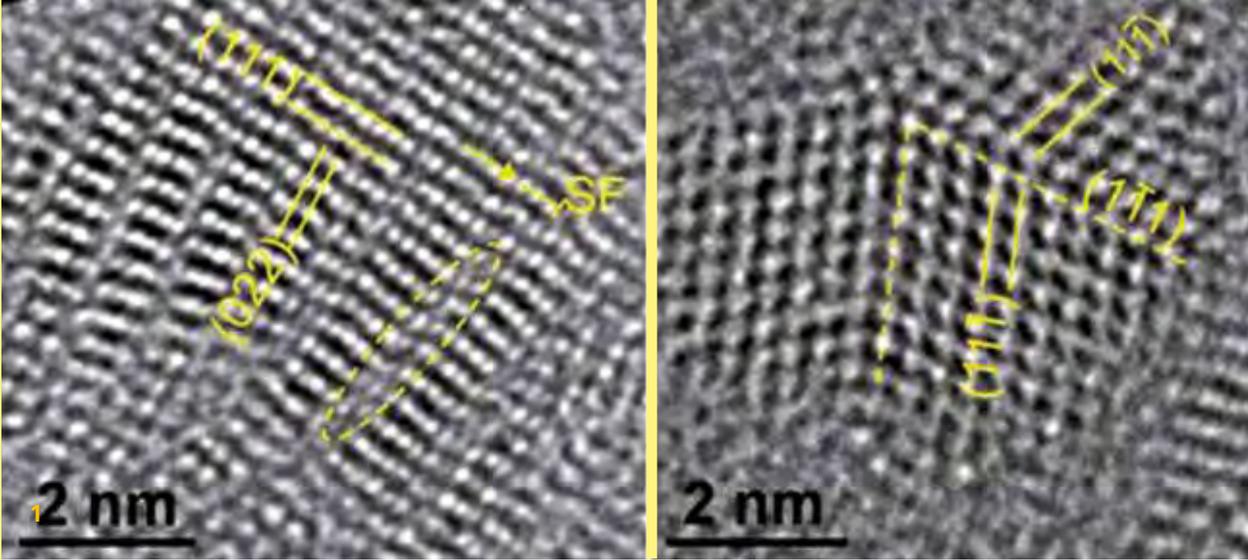
3 Gemessene Bordotierkonzentration einer mit Bor-LCP dotierten Linienstruktur.

- 1 LCP-Prozessierung eines Siliciumwafers.
- 2 Schematische Darstellung einer hocheffizienten Solarzelle mit rückseitigem Bor-LCP-LBSF.

Verwendet man ein borhaltiges Medium für den flüssigkeitsstrahlgeführten Laserprozess, so ergibt sich eine einfache Möglichkeit, Passivierungsschichten lokal zu strukturieren und gleichzeitig in den Öffnungen eine lokale Bordotierung zu erzeugen, wie sie z. B. als »Local Back Surface Field« (LBSF) in hocheffizienten Solarzellenkonzepten benötigt werden. Dadurch sind die Öffnung und die lokale Dotierung automatisch perfekt zueinander aligniert. Im Vergleich zu lokal mit Aluminium dotierten Kontakten weisen mit Bor dotierte Kontakte bezogen auf die Kontaktfläche eine deutlich geringere Rekombination auf.

Im Rahmen der lokalen Bordotierung mit LCP konnte experimentell die Integration des Bor-LCP Dotierungsprozesses in einen Herstellungsprozess für hocheffiziente Siliciumsolarzellen demonstriert werden. Die passivierte Rückseite wurde dabei mit Hilfe von Bor-LCP lokal geöffnet und dotiert. Als Flüssigkeitsmedium wurde eine alkalische Borlösung verwendet, die durch einen hohen Boranteil eine Oberflächendotierkonzentration von $N_{A,Bor} > 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ ermöglicht.

Im Vergleich zu undotierten LCP-Öffnungen mit Wasser als Strahlmedium zeigten die Solarzellen mit Bor-LCP einen wesentlichen Vorteil und erreichten Wirkungsgrade bis zu 20,9 %.



TANDEMSOLARZELLEN BASIEREND AUF KRISTALLINEM SILICIUM

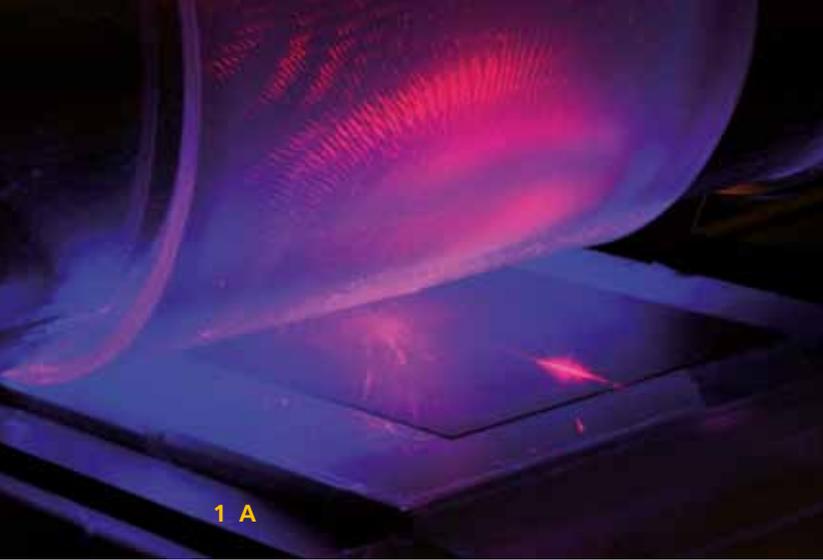
Einen vielversprechenden Weg, um die Konversionslimits von konventionellen Einfachsolarellen zu durchbrechen, stellen Tandemsolarellen basierend auf kristallinem Silicium dar. In Tandemsolarellen kann das Spektrum der Sonne wesentlich effektiver umgesetzt werden, indem eine oder mehrere Solarellen mit einer größeren Bandlücke als jener von kristallinem Silicium über der Siliciumsolarzelle gestapelt werden. Mit diesem Ansatz könnte die derzeit dominierende Siliciumwafer-Solarellentechnologie revolutioniert werden. Am Fraunhofer ISE kombinieren wir etablierte Technologien mit neuen und innovativen Materialien. Eine Möglichkeit hierbei ist ein Absorbermaterial aus Si-Nanokristallen, die in eine transparente Matrix integriert sind und Licht sehr effektiv und selektiv absorbieren. Die Bandlücke eines solchen Materials wird dabei von der Größe der Nanokristalle bestimmt.

Martin Hermle, **Stefan Janz**, Philipp Löper, Stefan Reber, Manuel Schnabel, Anke Witzky, Stefan Glunz

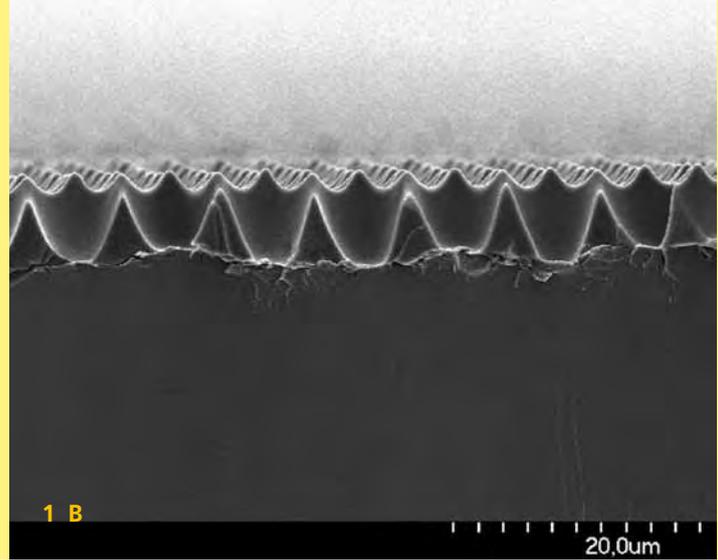
Tandemsolarellen aus kristallinem Silicium erlauben die Wirkungsgrade im Vergleich zu heutigen Siliciumsolarzellen zu erhöhen. Die besondere Attraktivität einer solchen Tandemsolarelle liegt darin, dass eine den Markt dominierende und erfolgreiche Technologie damit signifikant weiterentwickelt wird. Am Fraunhofer ISE nutzen wir unser umfassendes Wissen im Bereich Siliciumcarbid (SiC), das wir als Matrixmaterial für die Si-Nanokristalle einsetzen (Abb. 1). Neben der Herstellung dieser Si-Nanomaterialien mittels plasmaunterstützter Gasphasenabscheidung (PECVD) und Festphasenkristallisation (SPC) oder aus der Lösung verfolgen wir insbesondere die kristallographische und elektrische Charakterisierung der Strukturen sowie die Entwicklung einfacher Teststrukturen.

1 $Si_{1-x}C_x/SiC$ Multilagen nach einer Temperung bei 1000 °C, aufgenommen mit hochauflösendem Transmissionselektronenmikroskop (HRTEM). Im linken Bild ist ein Siliciumcarbid- und im rechten ein Silicium-Nanokristall sowie die indizierte Gitternetzebenen dargestellt. Die Aufnahmen entstanden in Kooperation mit der Universität Tübingen und dem Forschungszentrum Jülich.

Eine wichtige Fragestellung hierbei ist der Einfluss der Dotierstoffe und ihr Verhalten während der verschiedenen Hochtemperaturschritte. Weiterhin bestimmen wir mittels elektrooptischer Messmethoden wie zeitaufgelöster Photolumineszenz und eigens dafür entwickelter Messstrukturen die Transport- und Rekombinationseigenschaften der Nanomaterialien. So können aus elektrischen Leitfähigkeitsmessungen bei verschiedenen Temperaturen und unter verschiedenen optischen Spektren wichtige Rückschlüsse über die dominanten physikalischen Transportmechanismen in lateraler und vertikaler Richtung zur Multilagenstruktur gezogen werden. Für die monolithische Integration dieser neuen Absorbermaterialien in eine Tandemsolarelle entwickeln wir neuartige Tunnelkontakte sowie die notwendigen Solarellenprozesse sowohl für kristalline Silicium-Dünnschicht- als auch Wafersolarellen.



1 A



1 B

PHOTONENMANAGEMENT-STRUKTUREN FÜR SILICIUMSOLARZELLEN

Die Entwicklung der Siliciumsolarzellen ist von zwei wichtigen Trends geprägt: Um Material zu sparen, werden immer dünnere Wafer verwendet. Trotz der Verringerung des Absorbermaterials werden immer höhere externe Quanteneffizienzen angestrebt. Diese gegenläufigen Entwicklungslinien sind nur dann vereinbar, wenn photonische Strukturen für den Lichteinfang genutzt werden. Am Fraunhofer ISE entwickeln wir daher verschiedene Konzepte mikro- und nanostrukturierter Oberflächen, mit denen sowohl geometrisch-optische als auch diffraktive Effekte für das Photonmanagement ausgenutzt werden. Neben dem theoretischen Verständnis und optimierten Design dieser Strukturen sind Verfahren zur großflächigen Herstellung der definierten Strukturen ein zentrales Arbeitsziel.

Jan Benick, **Benedikt Bläsi**, Johannes Eisenlohr, Jan Christoph Goldschmidt, Hubert Hauser, Martin Hermle, Stefan Janz, Alexander Mellor*, Bernhard Michl, Sonja Seitz, Christian Walk, Christine Wellens, Stefan Glunz

* Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica de Madrid

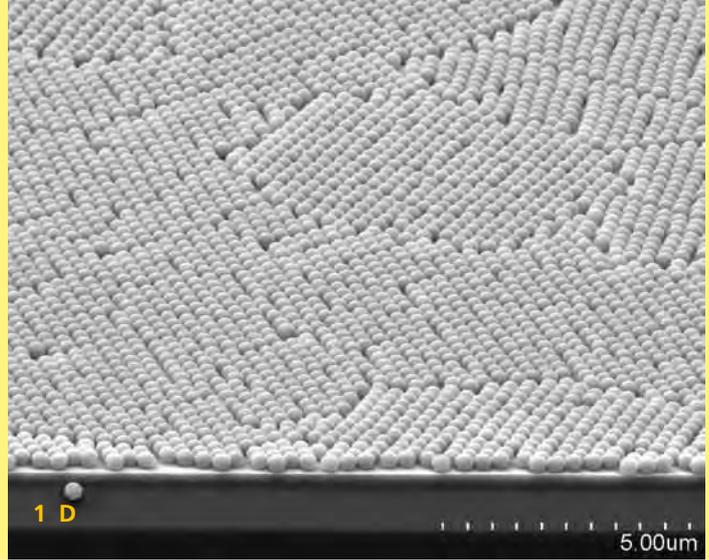
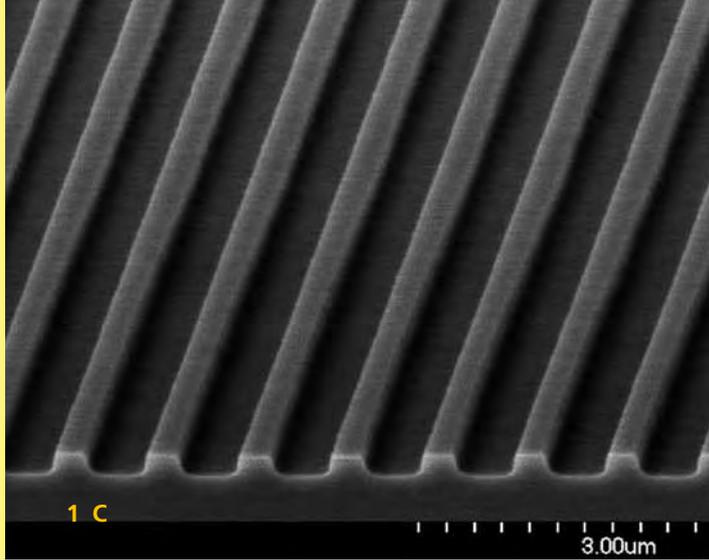
1 (A) Neu entwickelter Aufbau zur Rollen-NIL, mit dem Ätzmasken mit feinsten Strukturen realisiert werden können. Rote Laserstrahlung veranschaulicht die Licht lenkende Wirkung der Honeycombtextur. (B) Mittels Rollen-NIL strukturierte Ätzmaske auf einem rauen mc-Si Substrat. (C) In Silicium via NIL geätztes Liniengitter. (D) Monolage von SiO_2 Sphären eines Durchmessers von 350 nm auf einem Siliciumwafer.

Honeycombtexturen für die Zellenvorderseite

Industriell gängige Vorderseitentexturen für multikristalline Siliciumsolarzellen führen zu einer nicht optimalen Strahlungsausnutzung. Deutlich effizienter ist die sogenannte Honeycombtextur, die am Fraunhofer ISE bereits beim 2004 erzielten Weltrekord für diesen Materialtyp eingesetzt wurde. Um diese Textur industrietauglich realisieren zu können, arbeiten wir an Prozessen, welche die bei Höchsteffizienz-Solarzellen im Labormaßstab immer wieder genutzte Photolithographie ersetzen sollen. Dabei kommt ein Stempelverfahren, die Nanoimprint Lithographie (NIL), zum Einsatz, mit dem die für definierte Strukturen notwendige Ätzmaske in einem Prägeprozess strukturiert wird. Eine eigens entwickelte Rollen-NIL Anlage ermöglicht es, Ätzmasken mit sehr hoher Auflösung in einem kontinuierlichen Durchlaufprozess zu strukturieren und so diesen Prozess in Fertigungslinien zu integrieren (Abb. 1A). Die für die Stempelherstellung benötigten Masterstrukturen des hexagonalen Musters können großflächig mittels Interferenzlithographie erzeugt werden. Bisher kombinieren wir die NIL mit Plasmaätzprozessen, wodurch wir sehr effektive Vorderseitentexturen realisieren konnten (Abb. 1B und 2). In Zukunft werden wir ebenso die Kombination der NIL mit nasschemischen Ätzprozessen untersuchen.

Rückseitengitter basierend auf Interferenzlithographie

Ein weiteres Konzept, das dem Photonmanagement dient, basiert auf Beugungsgittern auf der Rückseite der Solarzellen. Dabei wird speziell langwelliges, nur schwach absorbiertes Licht, durch diffraktive Effekte auf lange Wege in der Zelle gelenkt. Auf diese Weise kann auch dieser spektrale Anteil effizienter genutzt werden. Hier setzen wir ebenfalls die NIL



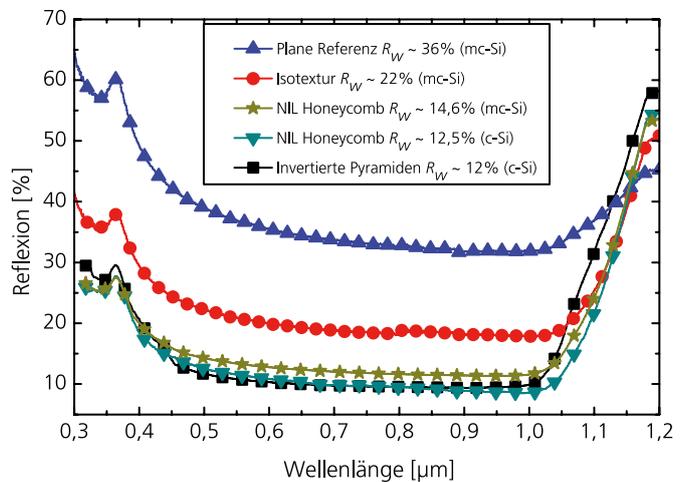
ein, um ausgehend von interferenzlithographisch realisierten Masterstrukturen kleinste Strukturen großflächig auf Wafer zu übertragen. Diese photonischen Strukturen können anschließend über Plasmaätzprozesse in das Siliciumsubstrat übertragen werden. Wir haben auf diese Weise Linien- und Kreuzgitter sowie hexagonale Strukturen mit Perioden von 1 μm realisiert und deren absorptionserhöhende Wirkung charakterisiert (Abb. 1 C und 3).

Rückseitenstrukturen mit Nanokugeln

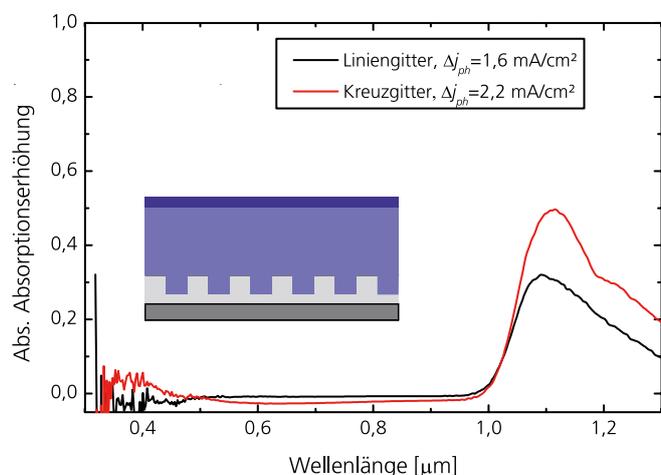
Eine weitere Möglichkeit, diffraktive Rückseitenstrukturen zu erzeugen, liegt in der Verwendung hexagonal angeordneter SiO_2 Nanokugeln (Abb. 1 D), die in einer hochbrechenden Matrix eingebettet sind. Der Vorteil dieses Ansatzes liegt darin, dass die Oberfläche des Siliciumwafers nicht beeinflusst wird und elektrisch ideal passiviert werden kann. Mittels optischer Simulationen kann gezeigt werden, dass die absorbierte Photonenstromdichte bereits bei einer Monolage von SiO_2 Nanokugeln deutlich erhöht werden kann. Zur Einbettung der Nanokugeln in eine hochbrechende Matrix untersuchen wir verschiedene Verfahren, wobei sich vor allem Atomlagenabscheidung (ALD) und Sol-Gel Prozesse als sehr erfolgreich herausgestellt haben.

Alle drei Strukturierungskonzepte sind viel versprechende Ansätze für die Realisierung von Zellkonzepten mit hoher optischer Effizienz bei geringem Materialbedarf.

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



2 Reflexionsmessungen an verschiedenen texturierten Siliciumsubstraten (ohne Antireflexschicht). Die mittels NIL und Plasmaätzen realisierte Honeycombtexur erreicht sowohl auf c-Si als auch auf mc-Si exzellente Werte nahe den invertierten Pyramiden.



3 Gemessene absolute Absorptionserhöhung hervorgerufen durch mittels NIL und Plasmaätzen realisierte Rückseitengitter in 200 μm dicken c-Si Substraten. Ebenso angegeben ist der daraus ermittelte Gewinn des Photostroms.

STROM AUS SONNENLICHT



PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND SYSTEME

Modultechnologie verwandelt Solarzellen in ein beständiges Produkt für den sicheren Betrieb in PV-Kraftwerken. Wir unterstützen Produktentwicklungen in Richtung optimaler Wirkungsgrade, reduzierter Kosten und höchster Zuverlässigkeit. Für die Qualitätssicherung von Modulen und Kraftwerken bieten wir umfassende Dienstleistungen von der Präzisionsmessung bis zum Monitoring an.

Modultechnologie

Unser neues Photovoltaik Modul-Technologiecenter (MTC) bietet eine große Bandbreite an Prozess- und Analyseplattformen für die Materialerprobung, die Produkt- und Prozessentwicklung. Die Wissenschaftler können aus dem Laborstadium heraus den direkten Weg zu aussagekräftigen Modulstückzahlen und -formaten einschlagen. Als Referenz für die Zellverbindung dient ein vollautomatischer Tabber-Stringer. Für die Fertigung von Modulen stehen Laminatoren mit Nutzflächen bis 1700 mm x 1000 mm zur Verfügung.

Umfassende Charakterisierungen in allen Fertigungsstufen ermöglichen eine zielgenaue Produkt- und Prozessoptimierung. Die Qualitätssicherung beginnt mit Eingangsuntersuchungen an den Materialien, von der Zelle über Zellverbinder und Folien bis hin zum Glas. Die Qualität der Fügestellen kann im Photovoltaik Modul-Technologiecenter (MTC) durch Benetzungsuntersuchungen, Schälprüfungen, Schlibbilder und hochauflösende Röntgenaufnahmen geprüft werden. Über stufenweise Charakterisierung können Leistung und Integrität der Zelle vom Lieferzustand über die Versträngung und Einkapselung bis in das fertige Modul verfolgt werden.

Die experimentellen Methoden werden ergänzt durch zahlreiche Rechenmodelle. Sie ermöglichen eine Analyse von Gewinn- und Verlustfaktoren bei der Verschaltung und Verkapselung von Solarzellen, sie geben Aufschluss über mechanische Beanspruchung und über elektrische und optische Effekte im Modul.

Gebrauchsdaueranalyse und Umweltsimulation

Entscheidend für die Rentabilität eines PV-Kraftwerks ist neben der Systemeffizienz die Lebensdauer seiner Komponenten. Wir untersuchen das Verhalten von Produkten, Komponenten und Materialien über ihre Lebens- bzw. Gebrauchsdauer. Dazu gehören u. a. Materialprüfungen und Computersimulationen von Belastungstests und Alterungserscheinungen an verschiedenen Materialien, Komponenten und Produkten, z. B. PV-Modulen.

Mit unserer Analytik untersuchen wir den Einfluss der klimatischen Belastung. Dabei geht es um das möglichst frühzeitige Erkennen von Alterungsmechanismen, deren Ursachen und Wirkung auf das Material, die Produktkomponenten und das ganze Produkt. Diese Untersuchungen erfolgen weitestgehend mit Hilfe von zerstörungsfreien Methoden, wie z. B. optischer Mikroskopie, Ramanspektroskopie, FTIR-Spektroskopie und Elektrolumineszenzaufnahmen. Auch die Entwicklung von neuen oder kombinierten Charakterisierungsmethoden gehört zu unseren Aufgaben. Ziel dieser Anstrengungen ist u. a. in Zukunft zerstörende Messmethoden durch zerstörungsfreie zu ersetzen.

Das Verständnis und die Definition der Ursachen der Alterung ist Aufgabe der Umweltsimulation, bei der im Feld das Verhalten von Prüflingen, z. B. PV-Modulen, an ausgewählten Standorten genauestens beobachtet und dokumentiert wird. Wir nutzen Standorte in Freiburg (gemäßigtes Klima), unterhalb der Zugspitze (alpines Klima), in der Negev-Wüste (subtropisches Klima), auf Gran Canaria (maritimes Klima) und in Jakarta (tropisches Klima). Die Arbeiten im Bereich der Umweltsimulation sollen dazu führen, das Alterungsverhalten von neuen Materialien, Komponenten und Produkten während ihrer Lebens- bzw. Gebrauchsdauer besser verstehen und prognostizieren zu können.



Für die Prüfung stehen nicht nur die Einrichtungen unseres seit 2006 akkreditierten TestLab PV Modules zur Verfügung, sondern auch spezielle Prüfanlagen zur Kombination oder Verschärfung von Belastungen.

Qualitätssicherung PV-Module, -Systeme und -Kraftwerke

Mit den vier Phasen des Fraunhofer ISE Qualitätszirkels – Ertragsgutachten, Modultmessungen, Anlagenprüfung und Monitoring – stellen wir eine umfassende Qualitätssicherung von PV-Modulen und -Kraftwerken sicher. Neben einer guten Planung und dem Einsatz hochwertiger Komponenten entscheidet sie über den effizienten Betrieb einer PV-Anlage.

In der Planungsphase einer PV-Anlage greifen wir auf aussagekräftige Strahlungs- und Wetterdaten zurück und simulieren den Aufbau der Anlage exakt. Ertragsmindernde Faktoren wie Verschmutzung und Verschattung werden präzise ermittelt. Durch eine starke Vernetzung innerhalb des Fraunhofer ISE und weltweite Kooperationen ist gewährleistet, dass aktuelle Forschungsergebnisse in die eigens entwickelte Simulationssoftware einfließen.

Zur präzisen Messung und Charakterisierung von PV-Modulen bietet unser CallLab PV Modules eine Vielzahl an Standard- und Präzisionsmessungen für Forschung, Entwicklung und Produktion an. Das CallLab PV Modules des Fraunhofer ISE zählt mit einer Messunsicherheit von weniger als 2 % bei kristallinen Modulen zu den führenden Labors weltweit. Wir kalibrieren Referenzmodule für Produktionslinien und überprüfen an ausgewählten Stichproben die Einhaltung der garantierten Leistung nach internationalen Standards.

Randversiegeltes PV-Modul, das wir zusammen mit Partnern am Fraunhofer ISE entwickelt haben. Die TPedge-Technologie kann durch ihren reduzierten Materialeinsatz und die beschleunigte Fertigung die Herstellkosten für Module um 35 Prozent senken. Das Fraunhofer ISE unterstützt die Entwicklung von PV-Modulen und -Systemen in Richtung optimaler Wirkungsgrade, reduzierter Kosten und höchster Zuverlässigkeit. Für die Qualitätssicherung von Modulen und Kraftwerken bieten wir ein umfassendes Paket an Dienstleistungen von der Präzisionsmessung bis zum Monitoring an.

Hat eine PV-Anlage den Betrieb aufgenommen, so gibt eine umfangreiche Vor-Ort-Analyse Aufschluss über die Qualität der Anlage. Unser Leistungsangebot umfasst unter anderem die visuelle Anlagenprüfung, die Anfertigung von thermographischen Aufnahmen und die Ermittlung der tatsächlichen Leistung. Minderleistung, Schwachstellen und Abweichung von technischen Standards können somit frühzeitig erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden.

Über die komplette Betriebsdauer einer PV-Anlage hinweg bietet unser kundenspezifisches PV-Monitoring eine präzise Analyse der Effizienz von Systemen und Komponenten. Es basiert auf langjähriger Erfahrung mit nationalen und internationalen Projekten und auf dem hohen wissenschaftlichen Niveau unserer Arbeiten. Das Fraunhofer ISE sichert durch eine lückenlose Qualitätssicherung für PV-Module und -Kraftwerke optimale Erträge.

ANSPRECHPARTNER

Modultechnologie	Dr. Ulrich Eitner	Telefon +49 761 4588-5825 ulrich.eitner@ise.fraunhofer.de
Gebrauchsdaueranalyse und Umweltsimulation	Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. (Arch.) Claudio Ferrara	Telefon +49 761 4588-5650 claudio.ferrara@ise.fraunhofer.de
Qualitätssicherung PV-Module, -Systeme und -Kraftwerke	Dipl.-Ing. Klaus Kiefer	Telefon +49 761 4588-5218 klaus.kiefer@ise.fraunhofer.de

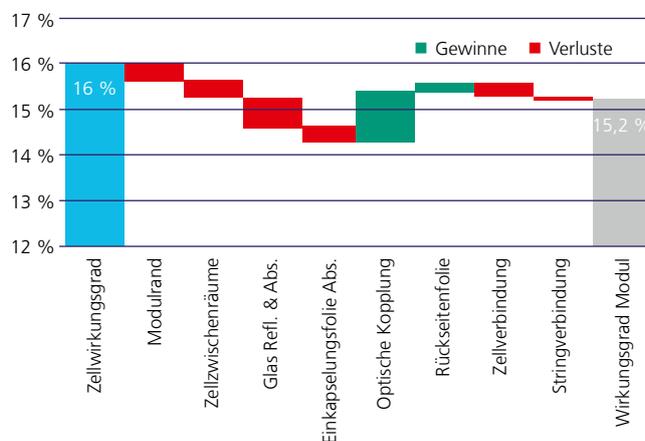


TopMod: EFFIZIENTE MODULTECHNOLOGIE FÜR MINIMALEN WIRKUNGSGRADVERLUST

Im Rahmen unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist es gelungen, aus kommerziellen Silicium-solarzellen mit einem nominellen Wirkungsgrad von 16,0 % ein Solarmodul aus insgesamt sechzig Solarzellen herzustellen, dessen Wirkungsgrad 15,2 % bezogen auf die gesamte Modulfläche beträgt. Damit gingen nur 5 % relativ des ursprünglichen Zellwirkungsgrads verloren. Grundlage dieser Optimierung ist die Effizienzanalyse, die Verkapselungs- und Verschaltungsverluste detailliert quantifiziert. Die Reduktion des Wirkungsgradverlusts konnte durch eine Kombination von Maßnahmen erzielt werden, insbesondere durch optische und elektrische Optimierung sowie eine deutliche Reduktion der inaktiven Modulfläche.

Ulrich Eitner, Ingrid Hädrich, **Marco Tranitz**, Harry Wirth

1 TopMod-Detaillaufnahme: 60 Zellenmodul (1592 x 962 mm²).



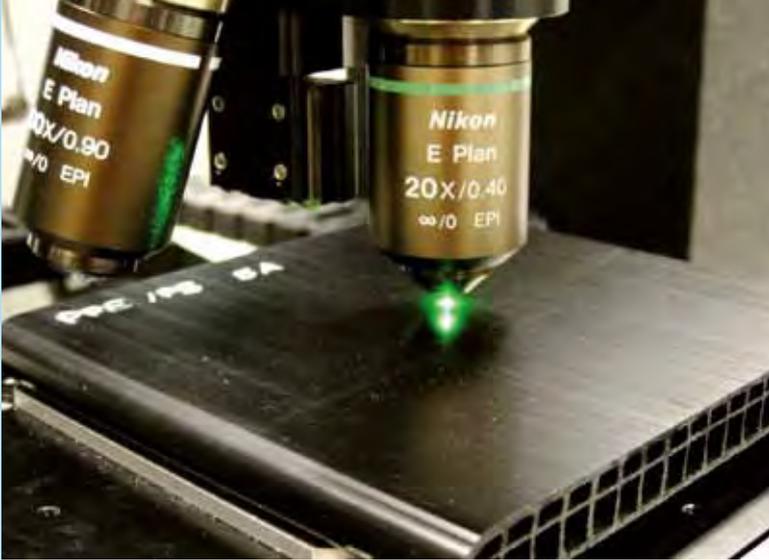
2 Effizienzanalyse mit detaillierter Aufschlüsselung der Wirkungsgradverluste.

Die Entwicklung und der Aufbau dieses Solarmoduls erfolgten auf Basis der Effizienzanalyse (Abb. 2), welche die optischen und elektrischen Verluste von der Zelle zum fertigen Modul charakterisiert. Hohe Modulwirkungsgrade helfen, die flächenproportionalen Kosten im Modul und später im System zu reduzieren – beides senkt die Gestehungskosten für PV-Strom.

Bei den verwendeten Solarzellen handelt es sich um kommerzielle, multikristalline Siliciumsolarzellen, wie sie in heutigen Standard-PV-Modulen eingesetzt werden. Für eine sehr gute optische Einkopplung des Lichts ins Modul wird ein Frontglas mit einer Antireflexbeschichtung verwendet. Zudem wird der Abstand zwischen den einzelnen Solarzellen wie auch der Zellabstand zum Modulrand verringert, so dass das Solarmodul eine kleinere inaktive Fläche besitzt. Die Querverbinder, welche die Solarzellenstrings miteinander verschalten, werden hinter die Solarzellen verlegt. Um diesen schlanken Modulrand realisieren zu können, wird auf eine spezielle Randversiegelung aus der Isolierglastechnik zurückgegriffen. Des Weiteren kommt eine spezielle Zellverbindungstechnologie zum Einsatz, mit der sich optische und elektrische Verluste reduzieren lassen. Mit der Entwicklung und dem Aufbau des optimierten Solarmoduls konnten wir einen großen Schritt in Richtung Hocheffizienz-Modultechnologie gehen. Wir sehen weiteres Effizienzpotenzial, das wir erschließen wollen.

Die Präzisionsmessung des Solarmoduls wurde am akkreditierten Callab PV Modules mit einer Genauigkeit von +/- 2,3 % relativ durchgeführt.

Das Projekt wurde durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Förderprojekts »Aufbau eines Modul-Technologiezentrums« unterstützt.



ALTERUNGSUNTERSUCHUNGEN AN POLYMEREN SOLARABSORBERMATERIALIEN

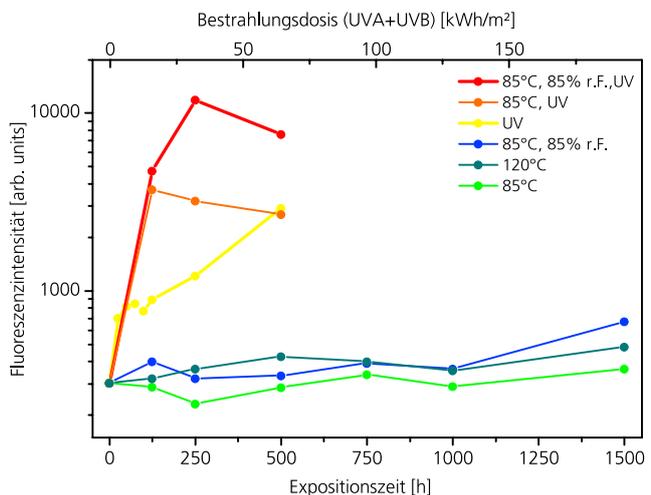
Solarabsorber in thermischen Solarkollektoren bestehen gegenwärtig aus teuren und begrenzt verfügbaren Rohstoffen wie Kupfer oder Aluminium. Die alternative Verwendung von Polymeren als Solarabsorberrmaterial könnte neben wirtschaftlichen Vorteilen auch neue Möglichkeiten hinsichtlich eines ästhetischen und effizienten Kollektordesigns eröffnen. Vor diesem Hintergrund wurde die Witterungsbeständigkeit verschiedener Polymere untersucht. Die Prüflinge wurden beschleunigten Alterungsprüfungen und einer Freibewitterung in Gran Canaria und Freiburg unterzogen. Bei der Analyse des Alterungsverhaltens der Kunststoffe kamen oberflächensensitive, zerstörungsfreie Prüfverfahren wie konfokale Raman-Mikroskopie und Rasterkraftmikroskopie (AFM) zum Einsatz.

Miriam Falk, Thomas Kaltenbach, Michael Köhl, Cornelia Peike, Christoph Stöver, Karl-Anders Weiß, Harry Wirth

Vor dem Hintergrund einer möglichen Eignung als Solarabsorberrmaterial wurden Doppel- und Dreifachsteplatten aus schwarz eingefärbtem Polyphenylsulfid (PPS) sowie einem Polyphenylenether-Polystyrol Polymerblend (PPE-PS) unterschiedlichen beschleunigten Alterungsprüfungen unterzogen. Die klimatischen Parameter Temperatur, Feuchtigkeit und UV-Strahlung wurden dabei, mit Ziel einer Modellbildung, systematisch variiert. Weiterhin wurden Freibewitterungsprüfungen in maritimen und gemäßigten Klimaten durchgeführt (Abb. 1) und die Prüflinge analog charakterisiert.

Indikatoren für die chemische und physikalische Alterung der Polymere konnten mit Hilfe einfacher und schneller Verfahren wie der Raman- und Rasterkraftmikroskopie gewonnen werden. Diese Methoden verfügen über eine hohe Ortsauflösung im Submikro- bzw. Nanometerbereich und können

1 Raman-mikroskopische Analyse der Oberflächendegradation einer Polymer-Doppelsteplatte (links). Freibewitterung der Polymerproben in Porto Izquierdo, Gran Canaria (rechts).



2 Aus Raman-Flächenscans ermittelte Fluoreszenzintensität unterschiedlich gealterter PPS-Proben in Abhängigkeit von Expositionszeit und Bestrahlungsdosis.

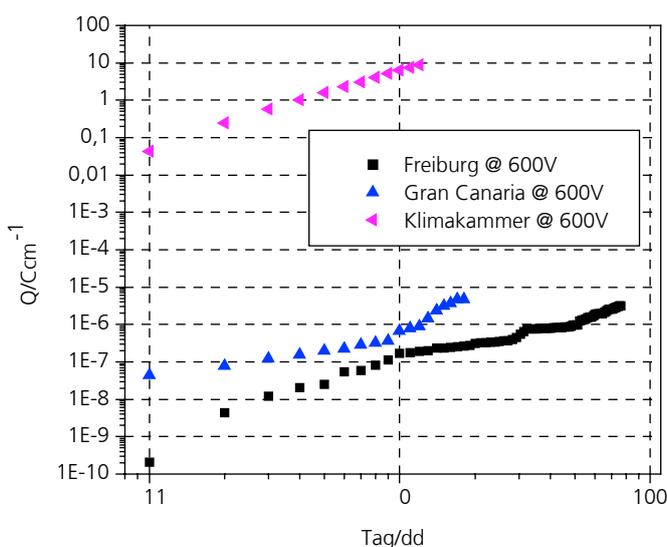
sonit Aussagen über die Homogenität der Alterungsprozesse liefern. Die Raman-spektroskopisch detektierte Fluoreszenz lässt sich auf die Entstehung von Chromophoren im Zuge der Polymeralterung zurückführen und dient als Indikator für die chemische Degradation. Die Fluoreszenzintensität der gealterten PPS-Proben offenbart eine starke Anfälligkeit der untersuchten Polymere gegenüber photochemischen Abbaumechanismen (Abb. 2). Anhand von AFM-Messungen wurden u. a. Aussagen über die Veränderungen der Oberflächenrauigkeit der Proben gewonnen, die als Indikator für die physikalische Degradation der Probenoberfläche angesehen werden können. Mit Hilfe der mikroskopischen Messmethoden konnten wir numerische Werte gewinnen, die eine Basis für die numerische Simulation der Alterungsdynamik bilden.



POTENTIALINDUZIERTE DEGRADATION (PID): SCHNELL- UND LANGZEITTESTS

In den vergangenen Jahren beschäftigte die PV-Industrie in zunehmendem Maß ein Phänomen, das einen schleichenden, aber reversiblen Leistungsverlust von PV-Generatoren zur Folge hat. Dieses Phänomen, das bei PV-Modulen am negativen Ende eines Strings auftauchen kann, ist unter dem Namen Potentialinduzierte Degradation (PID) bekannt. Um keine Einschränkungen im Systemaufbau hinsichtlich Verschaltung oder Wechselrichter hinnehmen zu müssen, soll das Problem der PID bereits auf Zell- und Modulebene gelöst werden. Um PID-resistente von anfälligen Modulen sicher zu unterscheiden, arbeiten wir sowohl an Schnelltests als auch an Langzeittests in der Freibewitterung.

Stephan Hoffmann, Michael Köhl, Harry Wirth



2 Vergleich des kumulierten Leckstroms (Ladung pro Modulumfang in Coulomb/cm) unter verschiedenen klimatischen Bedingungen. Unterschiedliche Temperaturen und Luftfeuchten führen bei den identisch aufgebauten Prüflingen zu verschiedenen Strömen.

1 Teststand des Fraunhofer ISE auf Gran Canaria – Ermittlung des Klimaeinflusses auf die PID durch permanente Messung der Leistungs- und Leckstromdaten der Module sowie der Klimadaten. Im Vergleich zum Aufbau in Freiburg herrscht auf Gran Canaria eine höhere Luftfeuchtigkeit bei ebenfalls höherer Durchschnittstemperatur.

Mittels Schnelltest kann die Beständigkeit eines PV-Moduls gegen Potentialinduzierte Degradation (PID), aber auch der Einfluss der Klimaparameter auf das Auftreten von PID durch Messung der auftretenden Leckströme ermittelt werden. Im Test wird dazu eine Potenzialdifferenz von bis zu 1000 V (bzw. maximale Systemspannung) zwischen Erdung und Zellen angelegt – mit Hilfe einer geerdeten leitfähigen Folie auf der Verglasung bei trockenem Raumklima oder in Klimakammern bei definierter Temperatur und hoher, definierter Luftfeuchtigkeit.

Ergänzend dazu werden die Module an den klimatisch stark unterschiedlichen Freibewitterungsstandorten in Freiburg und auf Gran Canaria (Abb. 1) exponiert, um das Langzeitverhalten zu untersuchen. Dazu stehen hochauflösende Strommessgeräte zur Verfügung, die selbst kleinste Leckströme zwischen Zelle und Modulrahmen erfassen. Neben dem Leckstrom als wichtigem Indiz für das Auftreten von PID werden auch die Leistungsdaten der Module sowie die Klimadaten erfasst, um ein umfassendes Verständnis über PID zu erhalten und um später eine Extrapolation der im Labor gewonnenen Ergebnisse auf eine reale Expositionszeit von 25 Jahren zu ermöglichen. Die Beschleunigung der PID durch verschärfte Bedingungen in der Klimakammer beträgt mehrere Größenordnungen und führt innerhalb weniger Tage zum nahezu vollständigen Leistungsverlust des Moduls bei ca. 1 C/cm² (Abb. 2).

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



IST EINE PERFORMANCE RATIO VON MEHR ALS 90 PROZENT MACHBAR?

Das Fraunhofer ISE vermisst im Rahmen des PV-Qualitätszirkels seit vielen Jahren kommerzielle PV-Kraftwerke. Dabei beobachten wir immer noch langsam aber stetig steigende Gesamtnutzungsgrade. Dies legt die Frage nahe, wie weit sich die Qualität von PV-Anlagen noch steigern lässt – wo liegt die Grenze für den Anlagenwirkungsgrad?

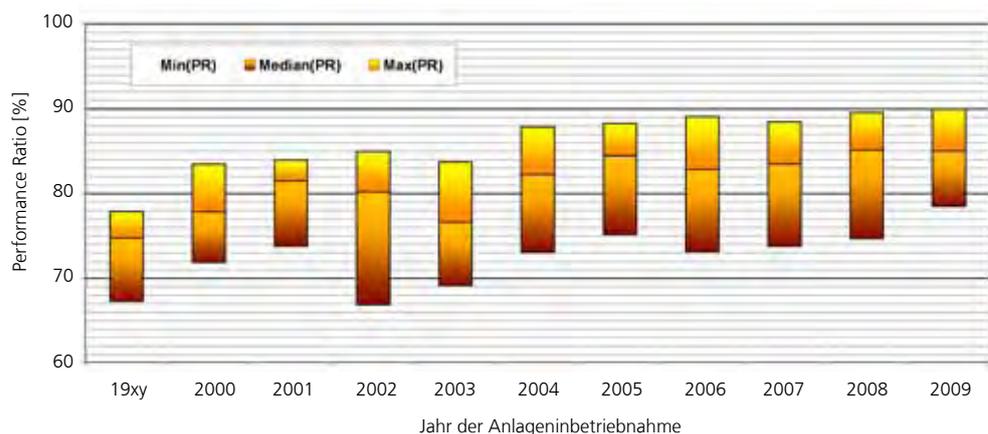
Alfons Armbruster, Klaus Kiefer, Björn Müller, Nils Reich,
Christian Reise, Harry Wirth

Die »Performance Ratio« (PR) dient seit langem als Effizienzindikator und Qualitätsmaßstab für PV-Kraftwerke. In fortlaufenden Untersuchungen vergleichen wir die PR von etwa 100 deutschen PV-Installationen der letzten Jahre mit denen von Anlagen aus den 1980er und 1990er Jahren. Dabei ist vorab zu definieren, welcher Einstrahlungswert in die PR-Bestimmung eingeht. Wird die Einstrahlung mit Pyranometern gemessen, ist die ermittelte PR (bezeichnet als PR_{pVR}) mit der Angabe im Ertragsgutachten vergleichbar. Bei einer Einstrahlungsmessung mit Silicium-Referenzzellen errechnet sich der – dann mit PR_{SI} bezeichnete – Gesamtnutzungsgrad systematisch um 2–4 % höher.

1 *Kommerzielles PV-Kraftwerk in Raunheim, 1 MW_p, Inbetriebnahme 2011.*

Für die knapp 100 betrachteten Systeme wurden im Betriebsjahr 2010 jährliche PR_{SI} -Werte zwischen etwa 70 % und knapp 90 % ermittelt, mit einem Median von etwa 84 %. Die 90 %-Marke für PR_{SI} wird also noch knapp verfehlt. Simulationen der Verlustmechanismen der zehn besten Systeme zeigen in vielen Bereichen allerdings noch weitere, wenn auch geringe Optimierungspotenziale, z. B. bei Wechselrichterwirkungsgraden, Verkabelungskonzepten sowie im Schwachlichtverhalten der PV-Module oder bezüglich der sogenannten »Plustoleranzen«. Obwohl wir 2010 im Monitoring des Fraunhofer ISE noch keine Werte der PR_{SI} oberhalb von 90 % nachweisen können, erwarten wir für zukünftige Systeme, unter vergleichbaren Temperatur- und Einstrahlungsbedingungen, häufiger PR_{SI} -Werte größer 90 %, selbst mit bereits heute kommerziell erhältlichen Komponenten.

2 *Median und Bandbreite der PR_{SI} für knapp 100 deutsche PV-Anlagen, dargestellt in Abhängigkeit des Jahres der Inbetriebnahme.*



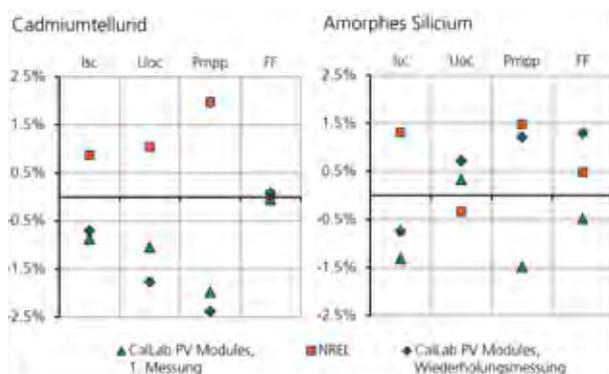


PRÄZISE LEISTUNGSMESSUNG FÜR DÜNNSCHICHT-PV-MODULE

Leistungsmessungen an PV-Modulen haben zum Ziel, die tatsächliche Leistung möglichst genau zu bestimmen. Dies ist für Module aus kristallinem Silicium in führenden Messlaboren mit Unsicherheiten bis zu $\pm 2\%$ möglich. Aufgrund einiger Besonderheiten von Dünnschicht-PV-Modulen unterliegt deren Messung zunächst höheren Unsicherheiten. Am Fraunhofer ISE wurde gezeigt, dass unter Beachtung bestimmter Regeln auch für Dünnschicht-PV-Module zukünftig Unsicherheiten im Bereich von $\pm 2\%$ erreichbar sein werden.

Daniela Dirnberger, Boris Farnung, Klaus Kiefer, Ulli Kräling, Frank Neuberger, Harry Wirth

1 Dünnschicht-PV-Module können künftig am Fraunhofer ISE mit einer Unsicherheit nahe $\pm 2\%$ vermessen werden.



2 Das Callab PV Modules erreichte bei Messungen eine Vergleichbarkeit mit dem NREL von besser als $\pm 2,5\%$ für zwei Dünnschicht-PV-Module. Um Veränderungen im Modul zu erkennen, wurde nach den Messungen am NREL eine Wiederholungsmessung durchgeführt. Bei einem Rundvergleich werden meist die vier charakteristischen Werte Kurzschlussstrom I_{sc} , Leerlaufspannung U_{oc} , Leistung P_{mpp} und der Füllfaktor FF verglichen.

Dünnschicht-PV-Module unterscheiden sich von Modulen aus kristallinem Silicium. Sie besitzen zum einen unterschiedliche spektrale Empfindlichkeiten, d. h. sie können Licht der verschiedenen Wellenlängen unterschiedlich gut verarbeiten, zum anderen weisen sie andere Stabilitätseigenschaften auf. Durch die verschiedenen spektralen Empfindlichkeiten unterliegt der zur präzisen Leistungsmessung benötigte spektrale Mismatch-Faktor einer größeren Unsicherheit, was die eigentliche messtechnische Herausforderung darstellt. Durch die Verwendung einer Referenzzelle mit gleichen Grenzen der spektralen Empfindlichkeit kann die Unsicherheit jedoch auf Werte nahe $\pm 2\%$ verringert werden.

Die Reproduzierbarkeit von Messungen an einem Cadmiumtellurid (CdTe)-Modul konnte im Callab PV Modules von 98,5 % auf 99,5 % verbessert werden. Zur Validierung von berechneten Unsicherheiten sind eine derartige Überprüfung der Reproduzierbarkeit sowie Vergleichsmessungen mit anderen Laboren notwendig.

Dabei muss auch eine weitere Herausforderung bei Messungen an Dünnschicht-PV-Modulen bewältigt werden: die Kontrolle ihrer Stabilität. Durch klimatisierte Lagerung, gegebenenfalls in Kombination mit Vorbehandlungsprozeduren vor einer Messung können die Module weitgehend stabilisiert oder, je nach Technologie, auf ein temporär stabiles Niveau gebracht werden. Eine vollständige Kontrolle der Stabilität ist jedoch nicht möglich.

Das Callab PV Modules führt regelmäßig Rundvergleiche auf internationaler Ebene durch und erreichte 2011 in einem Vergleich mit dem führenden Messlabor der USA, dem NREL, eine Vergleichbarkeit von $\pm 2,5\%$ für Messungen an einem CdTe-Modul und an einem Modul aus amorphem Silicium (Abb. 2). Den Hauptgrund für Abweichungen stellen Modulinstabilitäten dar.



VERSCHMUTZUNG VON PV-ANLAGEN: (K)EIN PROBLEM?

Wie stark mindert Verschmutzung auf meiner PV-Anlage den Ertrag? Diese Frage beschäftigt nicht nur viele Anlagenbetreiber, sondern auch Experten bei der Erstellung von Ertragsgutachten. Eine generelle Antwort ist jedoch nicht einfach zu geben. Um mehr über Ertragsverluste durch Verschmutzung zu lernen, hat das Fraunhofer ISE drei PV-Anlagen in Südwestdeutschland einer genaueren Untersuchung unterzogen.

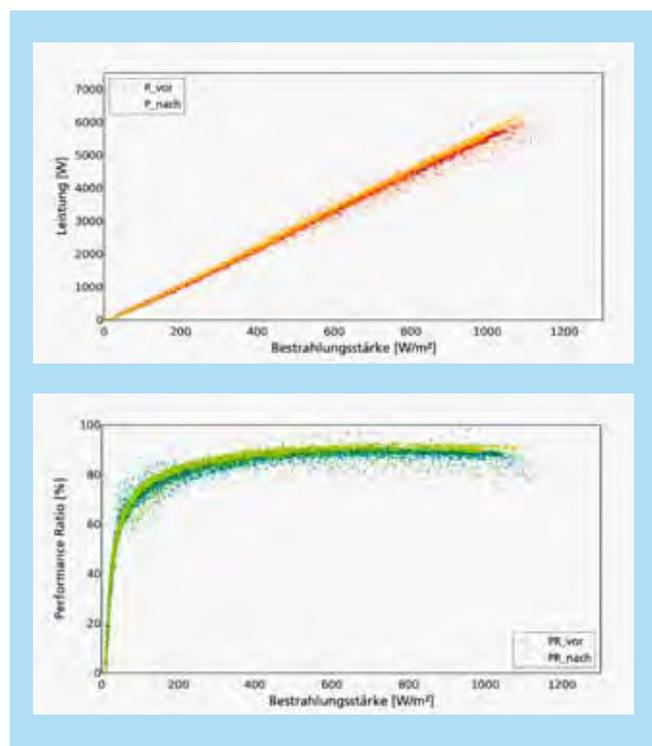
Daniela Dirnberger, Jan Gierse, Klaus Kiefer, Anselm Kröger-Vodde, Michele Rimini, Christian Reise, Harry Wirth

Die betrachteten Anlagen sind zwischen fünf und zwölf Jahre in Betrieb und werden seitdem vom Fraunhofer ISE im Detail vermessen. Wir messen die Einstrahlung mit einer Referenzsolarzelle, die ins Netz eingespeiste Energie der Gesamtanlage sowie den Strom und die Spannung der Solarmodule eines Teils der Anlage. Zusätzlich wurden für die Untersuchung Niederschläge erfasst, und der Einstrahlungssensor mehrmals wöchentlich gereinigt.

In einem Zeitraum von etwa vier Wochen wurde die Performance Ratio (PR) der nicht gereinigten Anlage mit einem regelmäßig gereinigten Sensor verglichen. Nach einer ersten Komplettreinigung der Anlage wurden die Daten weitere 4–6 Wochen aufgezeichnet. Für alle drei Anlagen wurde für den gesamten Beobachtungszeitraum auf Basis der Leistung ein Ertragsverlust von etwa 1,3 % bestimmt (Abb. 2).

Offen bleibt die Frage, wie lange es dauert, bis sich erneut eine vergleichbare Verschmutzung bildet. Selbst unter der unwahrscheinlichen Annahme, dass sich dieser Verlust auf ein ganzes Jahr übertragen lässt, würde sich eine jährliche Reinigung der Anlagen aus Kostensicht nicht lohnen. Weiterhin lässt sich das Ergebnis nur auf Anlagen mit ähnlichem

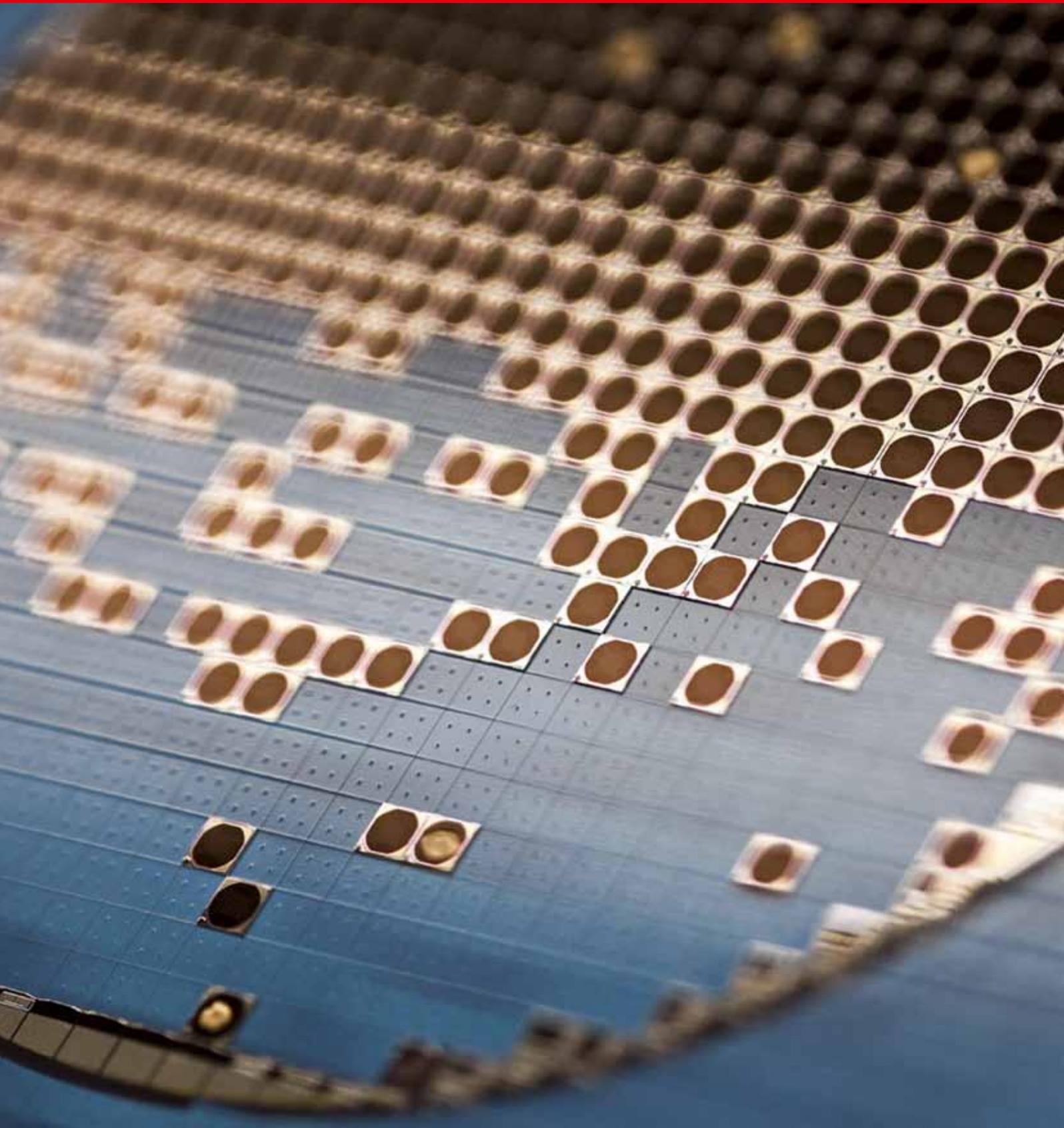
1 Die PV-Anlage auf dem Dach des Solar Info Center in Freiburg ist eine der drei Anlagen, deren Verschmutzungszustand untersucht wurde.



2 Der Vergleich der Performance Ratio vor und nach der Reinigung zeigt den Einfluss von Verschmutzung.

Standort übertragen: Wo PV-Module stärkerer Verschmutzung, z. B. durch Landwirtschaft, Industrie oder grundsätzlich hohes Staubaufkommen wie in Wüstengebieten ausgesetzt sind, ist eine individuelle Betrachtung notwendig. Das Fraunhofer ISE führt weitere Tests mit Einstrahlungssensoren durch und arbeitet an Konzepten zur allgemeinen Abschätzung von Ertragsverlusten durch Verschmutzung.

STROM AUS SONNENLICHT



ALTERNATIVE PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIEN

In Ergänzung zur Silicium-Photovoltaik (s. S. 58 ff.) erstreckt sich unsere Solarzellenforschung und -entwicklung auf weitere Photovoltaik-Technologien: III-V-basierende Halbleiter, Farbstoffsolarzellen und organische Solarzellen, die Konzentratortechnologie sowie 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 diese Technologie nun auch im terrestrischen Markt Anwendung findet. 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 Anwendung in Satelliten arbeiten wir derzeit schwerpunktmäßig an strahlungsresistenten Tripel- bis Sextupel-Zellen. Besonders vorteilhaft sind dabei Zellen mit geringem Gewicht. Wir entwickeln sehr dünne Zellen mit nur wenigen Mikrometern Dicke. Dazu entwickeln wir Techniken, welche die Solarzellenstrukturen vom Substrat trennen und auf andere Träger übertragen lassen. Unter anderem haben wir das sogenannte »Wafer-Bonding« sehr erfolgreich eingesetzt und können hierdurch neue Materialkombinationen realisieren. Weiterhin arbeiten wir daran, III-V Halbleiterstrukturen direkt auf ein Silicium-Substrat zu epitaxieren. Dabei erforschen wir zentrale Fragen im Materialbereich, wie Techniken zur Überwindung von Gitterfehlpassung und Spannungskompensation.

Farbstoffsolarzellen

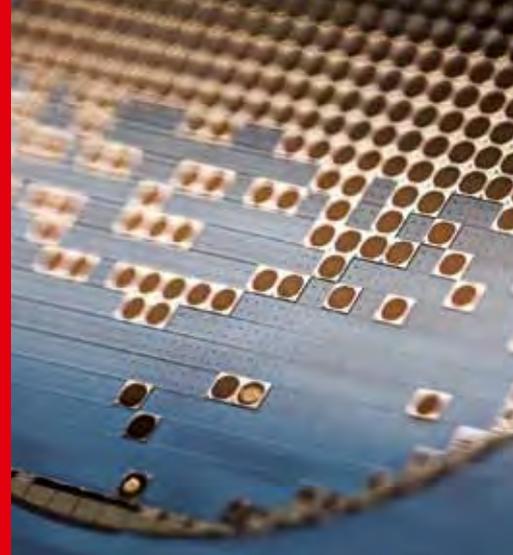
Die Technologie der Farbstoffsolarzellen hat sich in den letzten Jahren deutlich über den Labormaßstab hinaus entwickelt. Wir konnten zeigen, dass mit Siebdruck- und neuen Versiegelungstechniken Farbstoffsolarzellenmodule in industrienahen Techniken gefertigt werden können. Die Möglichkeit gestalterische Aspekte umzusetzen, wurde in Prototypen gezeigt. Die Beständigkeit der Module wird im Labor und unter Außenbewitterung getestet. In diesem Jahr gelang es am Fraunhofer ISE weltweit erstmalig, Prototypen von Farbstoffsolarmodulen in einer kommerziell interessanten Größe (60 cm x 100 cm) auf ungeteilten Substraten herzustellen. Die Aufskalierbarkeit des Herstellungskonzepts ist damit nachgewiesen.

Organische Solarzellen

Organische Solarzellen sind insbesondere aufgrund der erwarteten niedrigen Herstellungskosten attraktiv. Die hohe mechanische Flexibilität und das geringe Gewicht erweitern 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. Lebensdauern von einigen Jahren sind inzwischen realistisch.

Konzentratortechnologie

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 Konzentrationsfak-



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 Soitec Solar in Freiburg erfolgreich produziert wird (s. S. 17, Ehrungen und Preise, Nominierung Deutscher Zukunftspreis). In aktuellen Forschungsarbeiten untersuchen wir die Co-Generation von Wärme und Elektrizität in einem konzentrierenden System.

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 ab, 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.

Wafer mit Mehrfachsolarzellen auf Basis von III-V Halbleitern: Diese Höchstleistungssolarzellen, die seit vielen Jahren Satelliten mit Energie versorgen, konnten mit der Konzentratortechnologie erfolgreich in die terrestrische Anwendung gebracht werden. 2011 zählte die Technologie zur finalen Nominierungsrunde um den Deutschen Zukunftspreis. Der am Fraunhofer ISE erzielte Spitzenwirkungsgrad für Dreifachsolarzellen beträgt 41,1% bei 454facher Sonnenkonzentration. Weitere mit III-V Solarzellen bediente Spezialmärkte sind die Laser-Leistungsübertragung, die Thermophotovoltaik und weitere Sonderanwendungen.

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

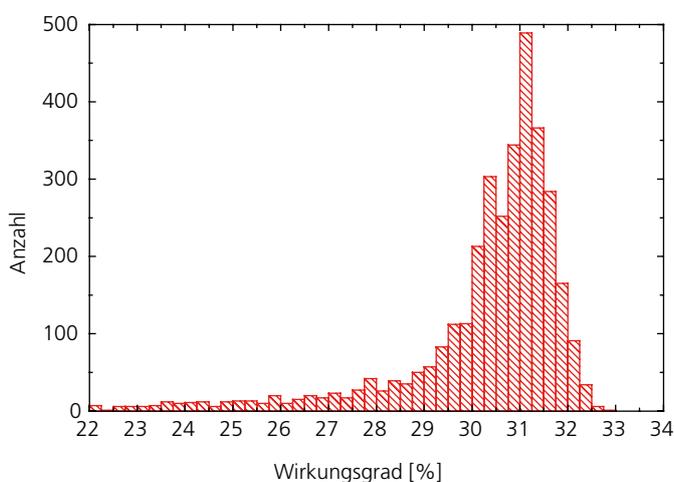


FERTIGUNGSPROZESSE FÜR FLATCON®-MODULE MIT SEKUNDÄROPTIKEN

Unsere FLATCON®-Konzentratormodule auf der Basis der III-V Dreifachsolarzellen erreichten bisher unter realen Betriebsbedingungen Wirkungsgrade von maximal 30 %. Dabei nutzen wir in unseren Modulen keine zweite optische Konzentradorstufe, um das Konzept möglichst einfach zu gestalten und damit schnell zu industrialisieren. Aktuell entwickeln wir nun industrielle Fertigungskonzepte für FLATCON®-Module mit Sekundäroptiken. Testmodule erzielten im realen Betrieb einen Wirkungsgrad von über 32 %.

Armin Bösch, Fabian Eltermann, Thorsten Hornung, Joachim Jaus, Gerhard Peharz, Gerald Siefer, Marc Steiner, Maik Wiesenfarth, **Andreas W. Bett**

Unsere Arbeitsgruppe entwickelt seit vielen Jahren Konzentratormodule. Ein Schwerpunkt war die Entwicklung der FLATCON® (Fresnel Lens All-Glass Tandem Cell Concentrator)-



3 Die Verteilung von 3478 Messungen des Wirkungsgrads an einem FLATCON®-Testmodul. Der Medianwert beträgt 30,8 %, der Maximalwert 32,9 %.

1 Solarzellenbaugruppen, auf denen industriell gefertigte reflektive Sekundäroptiken montiert wurden.

2 FLATCON®-Testmodul, das auf einer Nachführung auf dem Dach des Fraunhofer ISE montiert und elektrisch charakterisiert wurde.

Module. Eine Fresnellinse konzentriert das Sonnenlicht ca. 500fach auf eine 7 mm große Dreifachsolarzelle. Beim Fertigungsprozess der Module wie auch bei der Montage auf der Nachführeinheit gibt es Fertigungstoleranzen. Auch das direkte Licht der Sonne wird oftmals in der Atmosphäre gestreut und es bildet sich ein Hof um die Sonnenscheibe – die Zirkumsolarstrahlung. Mit einem Akzeptanzwinkel von ca. $0,4^\circ$ kann dies bei unseren FLATCON®-Modulen zu Ertragsverlusten führen. Daher ist der Einsatz einer zweiten Konzentradorstufe sinnvoll. Sie erlaubt es, solche »Fehler« zu kompensieren und kann auch eingesetzt werden, um den Konzentrationsfaktor zu erhöhen. Wir untersuchen beide Optionen und evaluieren Sekundäroptiken, die auf Basis von Reflektionen funktionieren, und andere Optiken, die refraktiv arbeiten. In diesem Jahr entwickelten wir mit unserem Industriepartner Soitec Solar die reflektive Sekundäroptik (Abb. 1) so weit, dass nun ein voll industriefähiger Fertigungsprozess zu Verfügung steht. Stückzahlen in Millionenhöhe können mit hohem Durchsatz und guter Ausbeute gefertigt werden. Gemeinsam statteten wir ein 6 kW System von Soitec Solar mit diesen Sekundäroptiken aus. Im direkten Ertragsvergleich bei Feldmessungen kann ein erhöhter Ertrag nachgewiesen werden.

Wir setzen diese reflektiven Sekundäroptiken auch in unseren FLATCON®-Testmodulen ein (Abb. 2). Abb. 3 zeigt Messdaten von einem Testmodul. Dabei wurde der Wirkungsgrad von 32 % mehrfach übertroffen.

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



KONZENTRATOR-PV-MODULE ZUR KOGENERATION VON STROM UND WÄRME

In aktiv gekühlten Konzentratormodulen kann der Gesamtwirkungsgrad deutlich gesteigert werden, wenn zusätzlich zur elektrischen Energie auch die generierte thermische Energie genutzt wird. Am Fraunhofer ISE entwickeln wir bereits seit mehreren Jahren aktiv gekühlte Module. Zur wissenschaftlichen Untersuchung der kompletten Konzentratorsysteme bestehend aus Optik, Kühlkreislauf und Empfängereinheit haben wir nun einen Außenteststand in Betrieb genommen. Im Teststand charakterisieren wir Konzentratormodule gleichzeitig elektrisch und thermisch. Dies ermöglicht den Vergleich unterschiedlicher Technologien oder Bauweisen unter realen Umgebungsbedingungen.

Alexander Boos, Alexander Dilger, Henning Helmers, Felix Jetter, Arne Kisser, **Maik Wiesenfarth**, Andreas W. Bett

In hochkonzentrierenden Systemen setzt man neben Linsensystemen auch Spiegeloptiken ein. Bei paraboloidförmigen Spiegelsystemen mit einer Fläche von mehreren Quadratmetern müssen die Solarzellen aktiv gekühlt werden. Das bedeutet, dass eine Vielzahl von Solarzellen mit einer Fläche von 1–2 cm² auf einem hocheffizienten Kühler möglichst dicht nebeneinander platziert und elektrisch verschaltet werden. Bei der Entwicklung solcher »Compact Concentrator Module« (CCM) (Abb. 2) liegt unser Schwerpunkt auf der Untersuchung der Langzeitstabilität sowie der Entwicklung von Produktionstechnologien, Verkapselungsmethoden und neuen Zellstrukturen für hocheffiziente, großflächige Solarzellen.

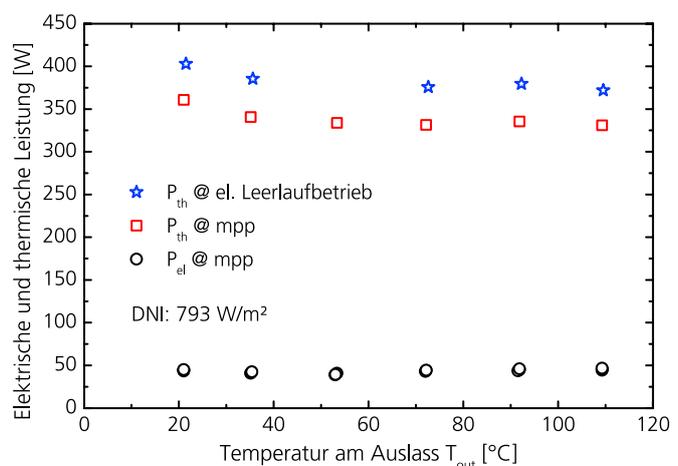
In den sogenannten CPVT (Concentrator Photovoltaic and Thermal)-Systemen wird neben der elektrischen Energie auch die thermisch generierte Energie genutzt. Bei einfacher Addition des thermischen und elektrischen Wirkungsgrads erzielt man Gesamtwirkungsgrade von 80 %. Um solche Wirkungsgrade zu verifizieren, haben wir einen Außentest-

1 Außenmessplatz am Fraunhofer ISE mit paraboloider Spiegeloptik, Modul und -halterung.

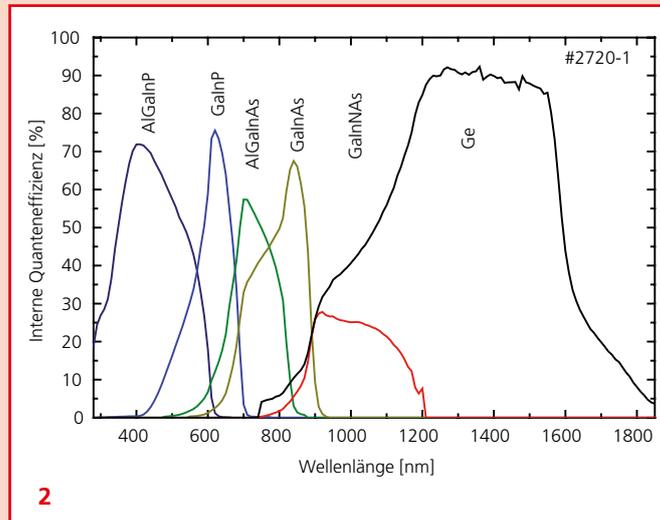
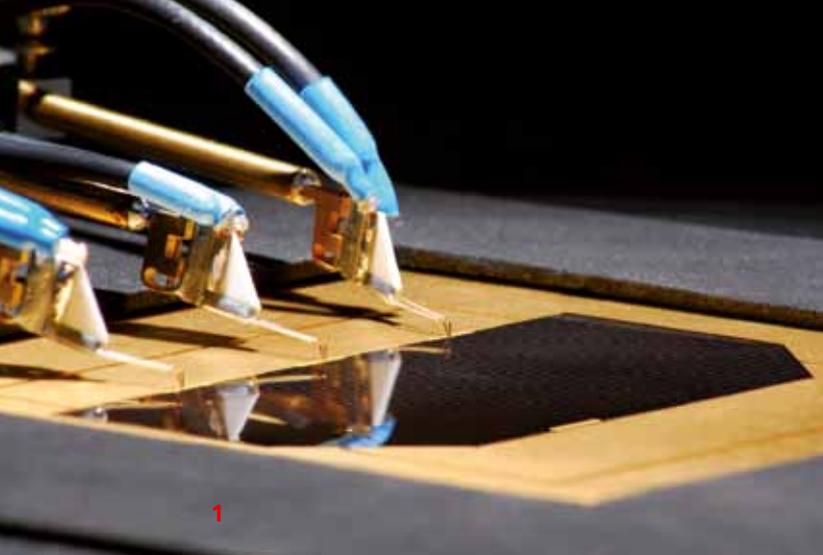
2 Dicht gepacktes Konzentratormodul mit aktiver Kühlung. Jede der vier MIM-Solarzellen (monolithisch integriertes Modul) hat eine Fläche von ca. 4 cm² auf der durch Serienschaltung von 23 Segmenten eine hohe Zellspannung erreicht wird.

stand aufgebaut (Abb. 1). Dazu entwickelten und testeten wir CCM-Prototypen mit unterschiedlichen Bauweisen. Bei ersten Hochtemperaturversuchen im Hybridbetrieb erreichten wir bei einer Kühlwassertemperatur von 109 °C eine thermische Nutzleistung von 331 W. Gleichzeitig lieferten die Konzentratorsolarzellen eine elektrische Leistung von 46 W (Abb. 3).

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unterstützt.



3 Am Außenteststand gemessene thermische und elektrische Leistung P_{th} und P_{el} des CCM-Prototypen (Abb. 1) über der Temperatur des Kühlwassers am Auslass T_{out} . Gezeigt werden Messungen im Hybridmodus bei maximaler elektrischer Leistung und im elektrischen Leerlaufbetrieb (blauer Stern = thermische Leistung).



ENTWICKLUNG UND CHARAKTERISIERUNG VON WELTRAUMSOLARZELLEN

Mit unserem Industriepartner AZUR SPACE Solar Power entwickeln wir seit über 15 Jahren erfolgreich Mehrfachsolarmodule für die Stromversorgung von Satelliten. AZUR SPACE ist heute der größte Lieferant dieser Spezialsolarzellen in Europa, gemeinsam haben wir kontinuierlich die Effizienz der Produkte verbessert. Dabei wurden Strukturen mit drei, vier, fünf und sogar sechs übereinander gestapelten pn-Übergängen realisiert. Gleichzeitig arbeiteten wir an der Entwicklung geeigneter Messgeräte und Verfahren zur Charakterisierung und Qualitätssicherung der Produkte.

Frank Dimroth, Stephanie Essig, Elvira Fehrenbacher, Vera Klinger, Ranke Koch, Eduard Oliva, Gerald Siefer, Michael Schachtner, Manuela Scheer, Katrin Wagner, Alexander Wekkeli, Andreas W. Bett

III-V Solarzellen erzielen die höchsten Wirkungsgrade für die Umwandlung des Sonnenlichts in elektrischen Strom. Klassische Vertreter für die III-V Materialien sind Gallium-Arsenid, Aluminium-Gallium-Arsenid, Gallium-Indium-Phosphid und andere. Im Gegensatz zu Silicium erlauben III-V Halbleitermaterialien durch eine Variation in der atomaren Zusammensetzung, die Empfindlichkeit für bestimmte Wellenlängenbereiche des Sonnenspektrums zu optimieren. Stapelt man mehrere Solarzellen mit Empfindlichkeit im blauen bis infraroten Spektralbereich übereinander, erhält man eine Mehrfachsolarmodule. Die Teilzellen sind auf einen bestimmten Spektralbereich optimiert und die sehr gute kristalline Qualität der eingesetzten III-V Materialien ermöglicht höchste Wirkungsgrade. Unter den Bedingungen im Weltraum liegt dieser für Dreifachsolarmodule bei etwa 30 %. Wir haben nun monolithische Solarzellen mit bis zu sechs pn-Übergängen realisiert (Abb. 2), die aus einem komplexen Schichtstapel mit bis zu 50 Einzelschichten bestehen. Ziel weiterer Entwicklungen ist es, die elektrische

1 Weltraumsolarzelle auf der Messapparatur eines XSIM Sonnensimulators.

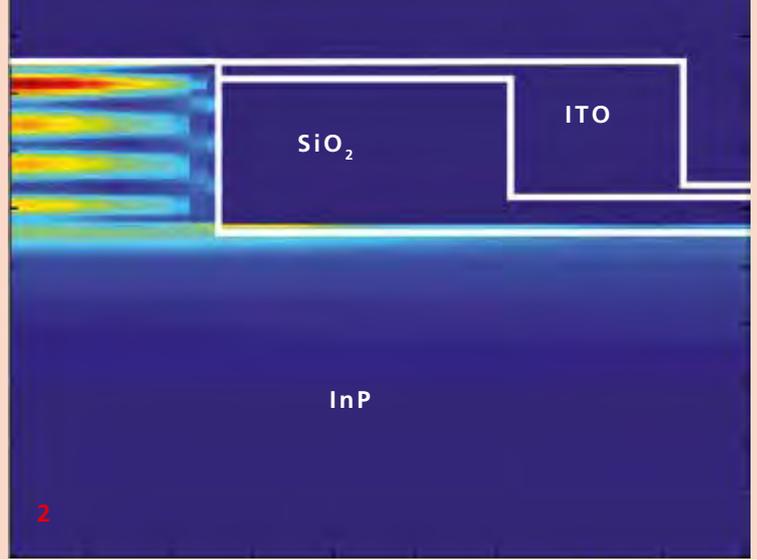
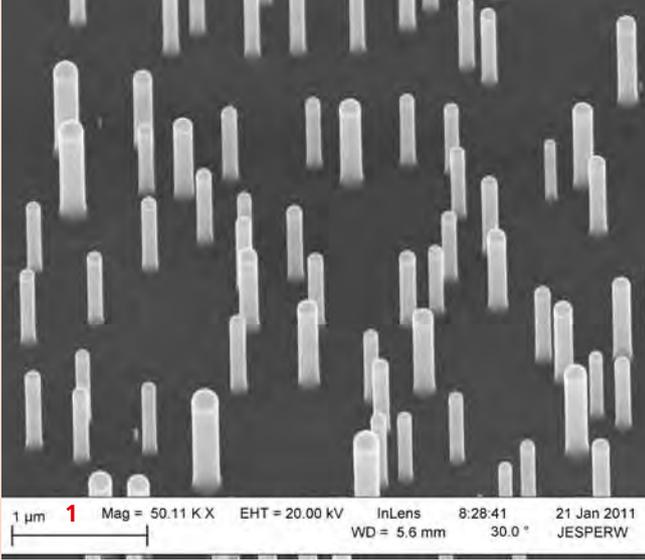
2 Interne Quanteneffizienz einer 6fach Solarzelle aus AlGaInP/GaInP/AlGaInAs/GaInAs/GaInNAs/Ge.

Leistung pro Fläche weiter zu erhöhen und die Zellen noch unempfindlicher für hochenergetischen Teilchenbeschuss im Weltraum zu machen.

Neben der Entwicklung neuer Weltraumsolarzellen arbeiten wir an der Messtechnik, um die Quanteneffizienz und IV-Kennlinien neuartiger Solarzellen unter dem extraterrestrischen Sonnenspektrum exakt zu bestimmen. Hierzu wurde mit der Firma Aescusoft ein neuer Sonnensimulator aufgebaut, der das Licht einer Xenon Blitzlampe über sechs unterschiedlich voneinander gefilterte Lichtwege auf die Messebene lenkt. Die Homogenität der Bestrahlungsstärke und der spektralen Bedingungen ist dabei eine besondere Herausforderung. Ziel ist es, die Leistung der Solarzellen mit einem Fehler kleiner als 2 % zu bestimmen. Außerdem forschen wir intensiv, um zuverlässige Messungen von Weltraumsolarzellen mit drei bis sechs pn-Übergängen anbieten zu können.

Diese Forschung wird gefördert durch unseren Projektpartner AZUR SPACE Solar Power, die Europäische Weltraumbehörde ESA-ESTEC und die Deutsche Gesellschaft für Luft und Raumfahrt (DLR)/BMBF.

www.III-V.de



CHARAKTERISIERUNG UND MODELLIERUNG VON NANOWIRE-SOLARZELLEN

Im Rahmen des EU-Projekts »AMON-RA« arbeiten wir mit Partnern aus Schweden, Dänemark, Österreich und Deutschland an der Entwicklung einer neuen Generation von Mehrfachsolarellen, die aus Tausenden von Nanowires bestehen – ca. 1 μm hohen und nur 100 nm dicken Säulen aus Halbleitermaterial, von denen jede eine kleine Solarzelle bildet. Diese nanostrukturierten Solarzellen erreichen theoretisch sehr hohe Effizienzen, benötigen jedoch nur einen Bruchteil des teuren III-V Halbleitermaterials. Die Nanowire-Solarzellen sollen in Zukunft direkt auf Silicium gewachsen werden und versprechen deutlich höhere Wirkungsgrade im Vergleich zu herkömmlichen Siliciumsolarellen.

Frank Dimroth, Tobias Gandy, **Peter Kailuweit**, Gerald Siefert, Michael Schachtner, Andreas W. Bett

Die höchsten erreichten Wirkungsgrade erzielen heute Mehrfachsolarellen auf Basis von III-V Halbleitermaterialien. Selbst solche Solarzellen sind in ihrem Wirkungsgrad durch verschiedene Faktoren limitiert. Die Materialauswahl ist begrenzt, da die Abstände der Atome im Kristallgitter der Solarzelle für alle verwendeten Materialien ähnlich sein muss, um eine hohe Materialqualität und damit hohe Wirkungsgrade zu gewährleisten.

Einen Lösungsansatz stellen Nanowire-Solarellen dar, die aus vielen nur 100 nm breiten Säulen geformt sind. Durch diese Geometrie dehnt sich der Kristall zur Seite hin aus, so dass man die optimalen Halbleiter für die Solarzelle auswählen und das Wirkungsgradpotenzial der Solarzelle erhöhen kann. Gleichzeitig benötigen die Nanowires weniger III-V Halbleitermaterial als eine herkömmliche Mehrfachsolarelle, denn ihre Umgebung ist mit Luft oder einem preiswerten Füllmaterial ausgefüllt.

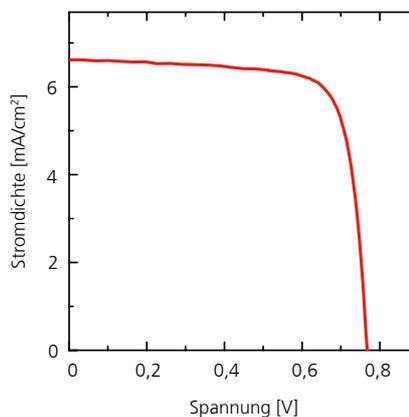
1 Elektronenmikroskopaufnahme von Nanowires, die an der Universität Lund hergestellt wurden und für unsere Solarzellen verwendet werden. Kleine Goldpartikel auf der Oberfläche dienen als Saatkörner für das Wachstum der Säulen.

2 Räumliche Ladungsträgergeneration bei einer Wellenlänge von 800 nm (Schnitt durch eine Symmetrieachse). Der Nanowire ist von einer Hülle aus Indium-Zinn-Oxid (ITO) und Quarz (SiO_2) umgeben.

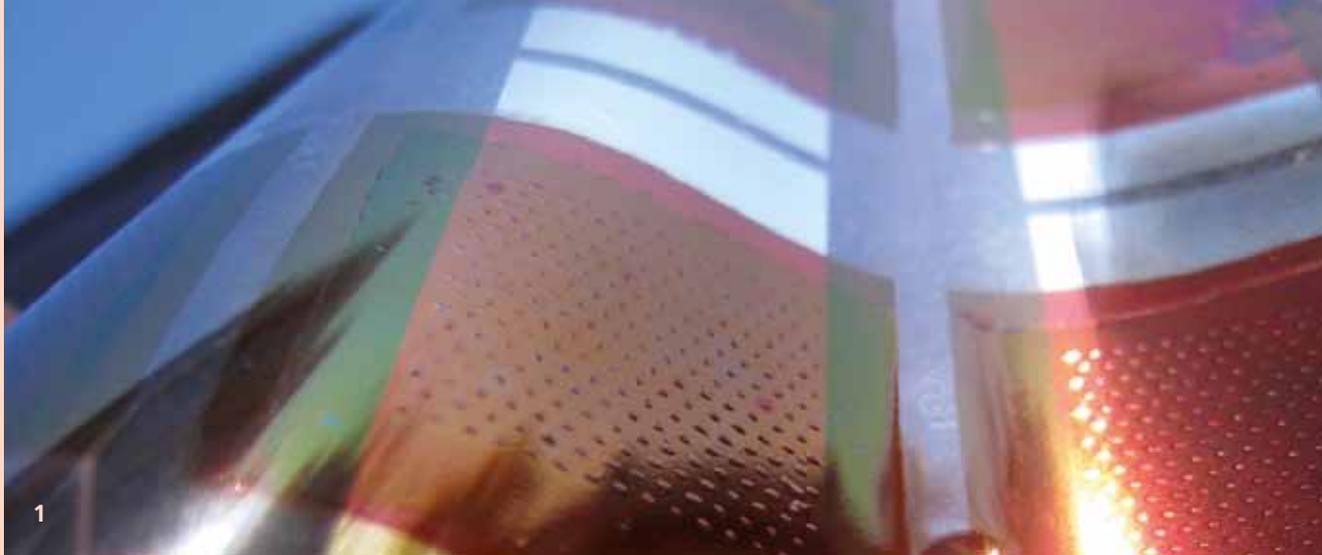
Ziel des Projekts »AMON-RA« ist es, funktionsfähige Mehrfachsolarellen aus Nanowires herzustellen. Wir charakterisieren die von unseren Partnern hergestellten Solarzellen elektrisch sowie optisch und helfen, die physikalischen Vorgänge in diesen neuartigen Solarzellen zu verstehen. Wir haben erste Zellen mit einem Wirkungsgrad von 3,8 % vermessen. Außerdem erstellen wir ein numerisches Modell zur optischen und elektrischen Simulation der Solarzellen und finden so Optimierungspotenziale für die weitere Entwicklung.

Das EU-Projekt »AMON-RA« wird von der Europäischen Union gefördert.

www.amonra.eu



3 Strom-Spannungskennlinie einer am Fraunhofer ISE vermessenen Nanowire-Solarelle mit einem Gesamtwirkungsgrad von 3,8 %.

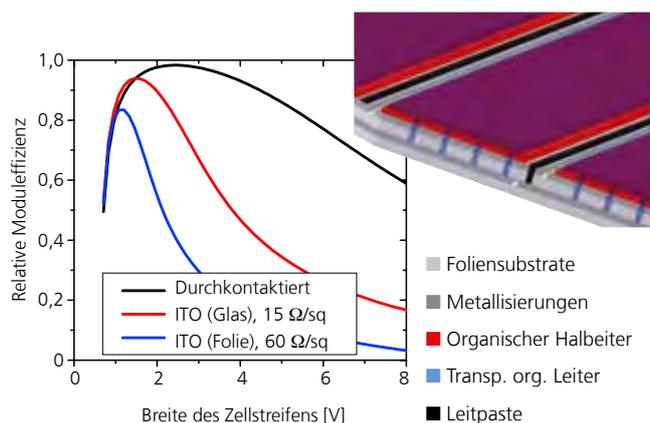


ENTWICKLUNG VON DURCHKONTAKTIERTEN ORGANISCHEN SOLARMODULEN

Organische Solarzellen haben in den letzten Jahren eine dynamische Entwicklung durchlaufen. Durch die vielfältigen Möglichkeiten der Synthese organischer Halbleiter konnte der Wirkungsgrad auf über 8 % gesteigert werden. Dieser Fortschritt macht eine wirtschaftlich relevante industrielle Umsetzung immer interessanter. Neben der Effizienz gewinnen deshalb die Lebensdauer und die kostengünstige Produktion auf großen Flächen zunehmend an Bedeutung. Wir arbeiten an einem skalierbaren Modulkonzept, das die teuren Komponenten Indium-Zinnoxid (ITO) und aufgedrucktes Silber vermeidet. Als stromführendes Element wird hierbei eine transparente, leitfähige Polymerschicht in Kombination mit rückseitig sammelnden Metallschichten eingesetzt.

Sebastian Schiefer, Uli Würfel, Birger Zimmermann, Stefan Glunz

Das Konzept der durchkontaktierten organischen Solarzelle und deren Serienschaltung zum Modul sind in Abb. 2 dargestellt. Der Strom wird dabei durch Löcher im Substrat auf die Rückseite geführt, wo sich eine zweite, flächige Metallisierung befindet. Dieses Konzept ähnelt den schon für Siliciumsolarzellen erfolgreich eingesetzten »Wrap-Through«-



1 Detailaufnahme einer durchkontaktierten organischen Solarzelle.

Strukturen. Dadurch können für beide Elektroden sehr kostengünstige Materialien wie Aluminium oder Kupfer verwendet werden. Durch die Verwendung von flexiblen Substraten ist die Kompatibilität zu einer Rolle-zu-Rolle Prozessierung gegeben. Die Kurven (Abb. 2 links) zeigen Simulationen, in denen der relative Modulwirkungsgrad als Funktion der Zellstreifenbreite bestimmt wurde. Im Vergleich mit auf ITO basierenden Modulen weist das Konzept der Durchkontaktierung neben der Kostenersparnis auch ein höheres Wirkungsgradpotenzial auf. Die gegenüber einer transparenten Elektrode deutlich bessere Leitfähigkeit einer flächigen Metallschicht ermöglicht erheblich größere Serienschaltungsabstände und damit einen geringeren Flächenverlust im Modul.

Experimentell konnten wir auf einer Fläche von 2,2 cm² mit einem Standardmaterialsystem aus Poly(3-Hexylthiophen) und [6,6]-Phenyl C₆₁ Buttersäure Methylester Wirkungsgrade von 3 % realisieren. Dieses Ergebnis ist sehr vielversprechend, da mit diesen Materialien üblicherweise etwa 3–4 % erreicht werden. Verbesserungspotenzial besteht beim Füllen der Löcher mit dem transparenten organischen Leiter. Hier treten momentan noch signifikante Serienwiderstände auf, die zu einer Reduktion des Füllfaktors führen.

Die Arbeiten werden von der Europäischen Union unterstützt.

2 Rechts sind schematisch die Durchkontaktierung und die Serienschaltung dargestellt. Links ist der relative Modulwirkungsgrad als Funktion der Breite der Zellstreifen für das durchkontaktierte Zellkonzept im Vergleich zu Modulen mit ITO-Elektroden gezeigt. Für die Serienschaltung wurde eine Verlustbreite von 1 mm angenommen.



FARBSTOFFSOLARMODULE – PHOTO-VOLTAISCH AKTIVES ARCHITEKTURGLAS

Farbstoffsolarzellen (FSZ) sind eine noch junge Photovoltaik-Technologie, die sich in den letzten Jahren deutlich über den Labormaßstab hinaus entwickelt hat. Eine große Herausforderung bei der Entwicklung neuer Photovoltaik-Technologien stellt die Aufskalierung – also der Schritt von der Laborgröße in die industrielle Umsetzung – dar. Mit der weltweit ersten Herstellung 60 cm x 100 cm großer Farbstoffsolarmodule auf einem durchgehenden Substrat ist Forschern des Fraunhofer ISE eine wichtiger Schritt gelungen.

Katarzyna Bialecka, **Henning Brandt**, Katrine Flarup-Jensen, **Andreas Hinsch**, Joanna Kaminska, Ramiro Loayza Aguirre, Welmoed Veurman, Stefan Glunz

Anders als bei herkömmlichen Solarzellen wandelt bei Farbstoffsolarzellen (FSZ) ein organischer Farbstoff Licht in elektrische Energie um. Die Module werden mit einfachem Siebdruck hergestellt und mit Glaslot in einem thermischen »Fusing«-Schritt versiegelt. Dabei findet auch die serielle Verschaltung statt. Diese Prozesse sind vergleichbar mit Produktionsprozessen wie sie z. B. aus der Glasindustrie bekannt sind. Die kürzlich realisierten, großflächigen 6000 cm² Module bedeuten daher einen wichtigen Schritt in Richtung einer kostengünstigen Herstellung von FSZ-Modulen. Ihre Zielanwendung ist die Integration in die Gebäudehülle.

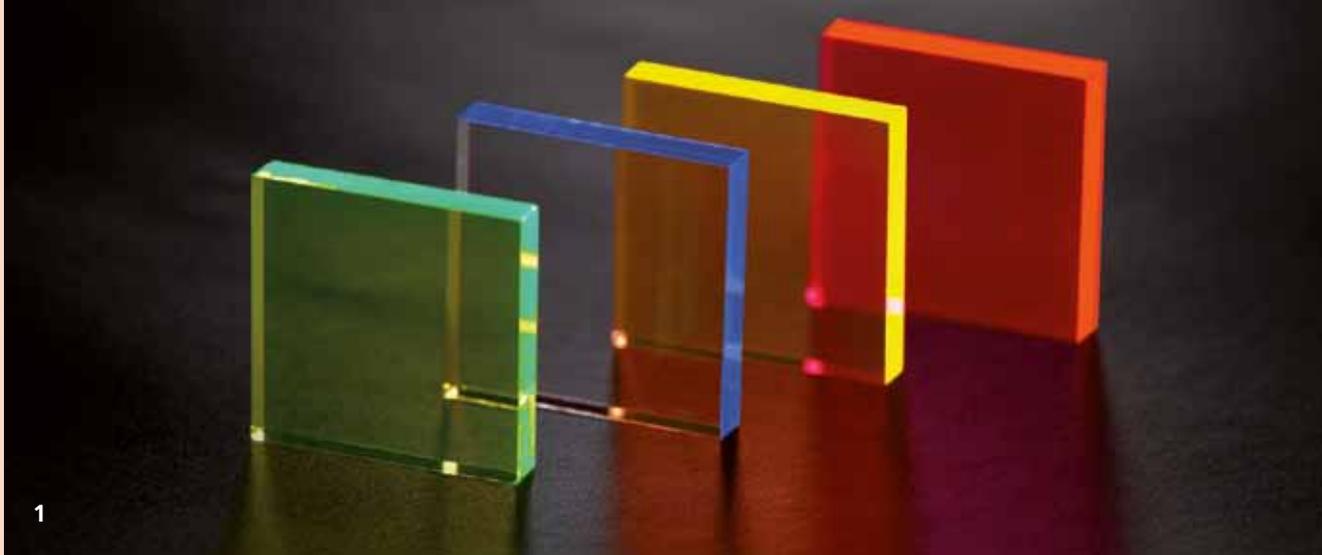
Bei dem am Fraunhofer ISE entwickelten Modulkonzept sind jeweils zwölf Solarzellen intern in Serie geschaltet. Zurzeit wird auf mit der gleichen Technik hergestellten 10 cm x 10 cm Modulen ein Wirkungsgrad von 7,1 % erreicht. Durch Verbesserung der Drucktechnik auf großen Flächen ist in nächster Zeit eine Steigerung des solaren Wirkungsgrads zu erwarten.

1 Das weltweit erste großflächige Farbstoffsolarmodul auf durchgängigem Substrat (60 x 100 cm²) hergestellt am Fraunhofer ISE.

2 Farbstoffsolarmodule können sowohl opak als auch transparent gestaltet werden und stellen somit eine interessante Applikation für die gebäudeintegrierte Photovoltaik dar.

Der Schwerpunkt unserer derzeitigen Arbeiten liegt in der Umsetzung der Prozessschritte in eine industrietaugliche Umgebung sowie in der Entwicklung von Methoden der Qualitätssicherung. Die Produktion von FSZ-Modulen eröffnet neue Absatzmärkte für Nanopartikel, Siebdruckpasten und Feinchemikalien. Deshalb arbeiten wir gezielt mit Unternehmen aus diesen Bereichen zusammen, die Interesse an den Arbeiten zu einer Herstellungs- und Vermarktungskoooperation für Farbstoffsolarzellen haben. Die Herstellung von Farbstoffsolarzellen kann in bestehende Prozesse zur Veredelung von Flachglas integriert werden.

Die Arbeiten wurden im Rahmen von Verbundprojekten durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das Umweltministerium Baden-Württemberg, die Baden-Württemberg-Stiftung und die Europäische Kommission gefördert.



NEUE SIMULATIONSMODELLE FÜR EIN BESSERES PHOTONENMANAGEMENT

Das Photonenmanagement bezeichnet Techniken, um den Weg des Lichts und dessen spektrale Zusammensetzung günstig zu beeinflussen. So lassen sich prinzipielle Beschränkungen des Wirkungsgrads herkömmlicher Solarzellen überwinden. Dazu untersuchen wir die Hochkonversion niederenergetischer Photonen, die sonst ungenutzt die Solarzelle passieren. Photonenmanagement kann jedoch auch benutzt werden, um mittels fortgeschrittener Fluoreszenzkonzentratoren Licht zu konzentrieren und die benötigte Solarzellenfläche zu verkleinern und so die Stromgestehungskosten zu verringern.

Benedikt Bläsi, Stefan Fischer, Judith Frank, Johannes Gutmann, **Jan Christoph Goldschmidt**, Martin Hermle, Barbara Herter, Stefan Janz, Janina Löffler, Marius Peters, Janina Posdziech, Tim Rist, Heiko Steinkemper, Stefan Glunz

1 *Verschiedene Fluoreszenzkonzentratoren, die unterschiedliche Spektralbereiche des Lichts zu ihren Kanten leiten.*

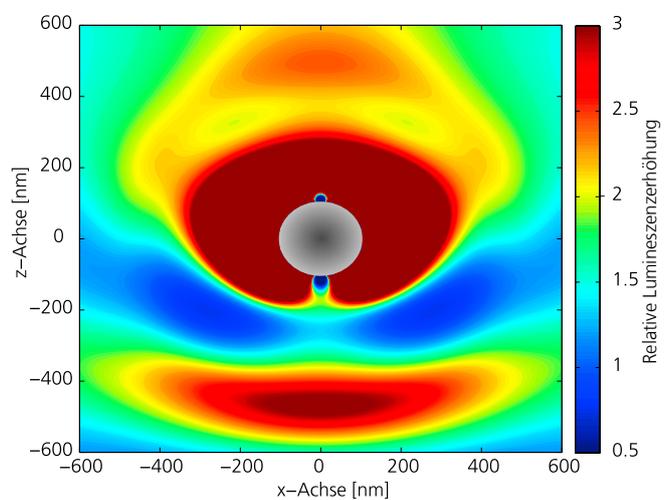
Rund 20 % der eingestrahnten Solarenergie gehen verloren, weil Siliciumsolarzellen Photonen mit Energien unterhalb der Bandlücke des Siliciums nicht nutzen können. Durch Hochkonversion werden diese Photonen in kurzwelligere Photonen umgewandelt, die sich dann in Standardsolarzellen nutzen lassen. Um die Effizienz dieses Prozesses zu steigern, untersuchen wir mehrere Konzepte: Die Kombination mit einem zweiten lumineszenten Material verbreitert den ausgenutzten Spektralbereich. Die Kombination mit Metall-Nanopartikeln verbessert die Effizienz des Hochkonversionsprozesses und spektral selektiv reflektierende photonische Strukturen sorgen dafür, dass die einzelnen Photonen in dem Teil des Systems genutzt werden, in dem sie mit der größten Effizienz umgewandelt werden.

Die erfolgreiche Entwicklung solch komplexer Systeme gelingt nur mit einer guten Modellierung der relevanten physikalischen Prozesse. Dazu wurde am Fraunhofer ISE ein Modell entwickelt, das über Ratengleichungen die Hochkonversion in Erbium beschreibt und sich prinzipiell auch auf andere Seltene Erden erweitern lässt. Zusammen mit Projektpartnern haben wir dieses Modell mit Berechnungen über die Eigenschaften von Metall-Nanopartikeln kombiniert. Damit lässt sich berechnen, wie Metall-Nanopartikel die Effizienz der Hochkonversion steigern (Abb. 2). Zusammen mit einer simulationsgestützten Optimierung bifazialer Siliciumsolarzellen für die Anwendung der Hochkonversion und mit einer theoretischen Beschreibung der photonischen Strukturen zum spektralen Management ist es jetzt möglich, die einzelnen Komponenten und das Gesamtsystem zu optimieren.

Darüber hinaus wurden am Fraunhofer ISE Möglichkeiten geschaffen, sowohl einzelne Komponenten als auch komplette Systeme aus Hochkonverter und Solarzellen umfassend zu charakterisieren. Dazu stehen kalibrierte Photolumineszenz-messplätze und Sonnensimulatoren mit konzentriertem Licht zur Verfügung.

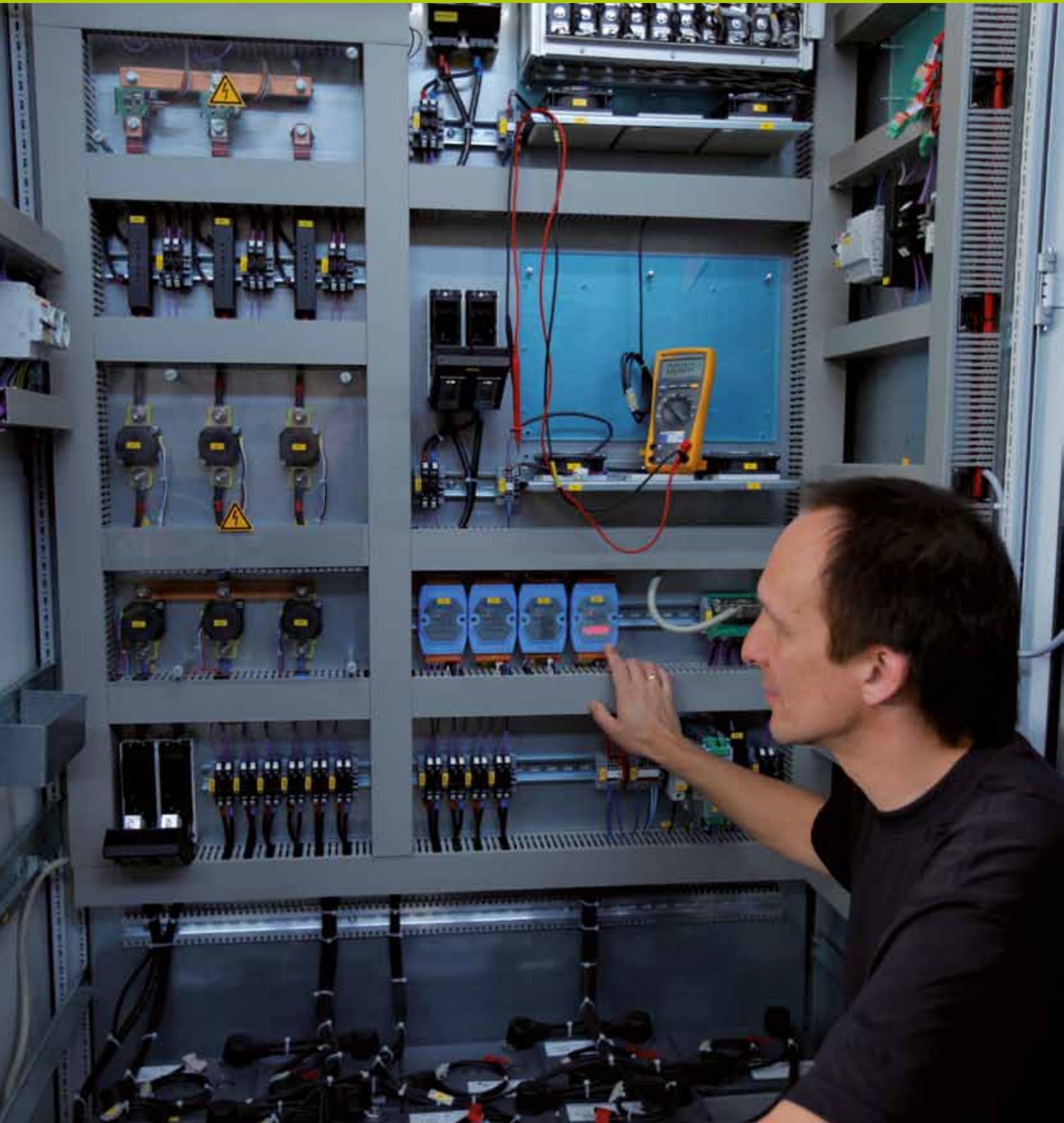
Fluoreszenzkonzentratoren können sowohl direkte Solarstrahlung als auch diffuses Licht konzentrieren. Dies ermöglicht Solarzellenfläche einzusparen und Kosten zu senken. Fluoreszenzkonzentratoren sind besonders für den Einsatz in Innenräumen und aufgrund ihrer Ästhetik auch für gebäudeintegrierte Anwendungen interessant. Für den kommerziellen Einsatz muss die Effizienz von Fluoreszenzkonzentratoren weiter gesteigert werden. Dies gelingt mit photonischen Strukturen, welche die Lichtleitung verbessern. Infrarot-aktive Halbleiter-Nanopartikel dehnen den genutzten Spektralbereich ins Infrarote aus. Mittels Finite Difference Time Domain (FDTD)-Simulation beschreiben wir die relevanten Phänomene im Nanometer-Bereich. Für die optische Beschreibung der gesamten Bauteile nutzen wir eine eigens entwickelte Monte-Carlo Simulation. Auch im Bereich der Fluoreszenzkonzentratoren werden die Modellierungen durch umfangreiche experimentelle Arbeiten ergänzt.

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



2 *Erhöhung der Hochkonversionsemission in der Nähe eines Metall-Nanopartikels: Diese wurde mit Hilfe eines speziellen Ratengleichungsmodells des Hochkonvertermaterials berechnet. Die Emission lässt sich in bestimmten Regionen um einen Faktor 3 steigern.*

STROMVERSORGUNG EFFIZIENT



REGENERATIVE STROMVERSORGUNG

Im Jahr 2011 hat der Anteil der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung in Deutschland erstmalig die 20 Prozent-Marke überschritten. Bis 2050 soll dieser Anteil auf 80 Prozent steigen. Die wesentlichen Zuwächse kommen von Windkraft und Photovoltaik. Beides sind wetterabhängige, fluktuierende Erzeugungsarten, die bei weiter steigendem Ausbau eine weitreichende Anpassung unseres Energieversorgungssystems erfordern. Um 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.

Besondere Bedeutung beim Ausbau der erneuerbaren Energien kommt elektrischen Speichern zu, die Unterschiede in Erzeugung und Verbrauch effektiv ausgleichen können. Speicherlösungen werden aber auch in autarken, nicht-netzgekoppelten Energiesystemen und zum Antrieb von Elektrofahrzeugen benötigt. 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 Speicherfähigkeit, verbesserte Betriebsführungsstrategien und die Entwicklung von Batteriemagementsystemen für alle gängigen Technologien.

Von allen erneuerbaren Energiearten weist die Photovoltaik die größte Dynamik auf. Ihr Anteil an der Stromerzeugung in Deutschland lag Ende des ersten Halbjahrs 2011 bereits bei 3,5 Prozent. Um dieses Wachstum auch weiterhin zu

sichern, müssen bei sinkender Förderrate auch die Kosten für die Systemtechnik weiter 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. Ferner müssen Wechselrichter bei weiter steigendem Anteil fluktuierender Erzeugung zukünftig mehr und mehr netzstützende Funktionen übernehmen. 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. Darüber hinaus führen wir für unsere Kunden alle in den neuen Netzanschluss-Richtlinien geforderten Tests an Umrichtern mit Nennleistungen bis über 1 MW durch.

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. Ein steigender Anteil der weltweit verkauften Photovoltaikmodule geht 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 sowie Wind- und Wasserkraft.



Zukünftig werden Fahrzeuge teil- bzw. vollelektrische Antriebe besitzen und ihre Energie aus dem Stromnetz beziehen (Elektro- und Plug-In-Fahrzeuge). 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
- orts aufgelöste Charakterisierung von Brennstoffzellen
- Test- und Entwicklungslabor für Trinkwasseraufbereitungssysteme

Testaufbau für ein hybrides Batteriesystem aus Blei- und Lithium-Ionen-Batterien. Neben der Entwicklung von Batteriemodulen und Batteriemanagementsystemen lassen sich damit insbesondere auch Umschaltvorgänge zwischen den verschiedenen Batterietechnologien untersuchen.

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
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	Dr. Joachim Koschikowski	Telefon +49 761 4588-5294 joachim.koschikowski@ise.fraunhofer.de
	Dr. 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



BIDIREKTIONALE NETZINTEGRATION VON ELEKTROFAHRZEUGEN

Der hohe Anteil an erneuerbaren Energien im zukünftigen Strommix führt zu einem fluktuierenden Angebot an elektrischer Energie. Dies erfordert neue Verfahren des Demand-Side-Managements sowie den Einsatz von Speichertechnologien. Elektrofahrzeuge der Zukunft könnten zum einen ihr Ladeverhalten an die Verfügbarkeit von Strom aus regenerativen Energien im Netz anpassen, zum anderen im Rahmen von Vehicle-to-Grid-Konzepten ihre Speicherkapazitäten für netzstützende Maßnahmen zur Verfügung stellen. Im Rahmen des VW-E.ON-Flottenversuchs hat das Fraunhofer ISE eine intelligente Ladeinfrastruktur konzipiert und demonstriert, welche die Ladevorgänge künftiger Elektrofahrzeuge steuert und an das Angebot an erneuerbaren Energien anpasst.

Eduard Enderle, **Robert Kohrs**, Michael Mierau, Christof Wittwer, Günther Ebert

Kernstück des Lademanagements ist ein Optimierungsalgorithmus, der auf dem im Fahrzeug integrierten mobilen Smart-Meter (mSM) implementiert ist. Dieser Optimierungsalgorithmus erstellt einen kostenoptimalen Ladefahrplan, der unter Berücksichtigung eines hinterlegten Batteriemodells sowie der vom Nutzer eingegebenen Abfahrtszeit den Bezug und das Rückspeisen elektrischer Energie an das fluktuierende Angebot erneuerbarer Energien anpasst. Das Anreizsignal mit dem das Energieangebot kommuniziert, ist ein viertelstundengenauer dynamischer Stromtarif.

¹ *Ansicht der im Rahmen des VW-E.ON-Flottenversuchs entwickelten intelligenten Ladestationen.*

In Spitzenlastzeiten können über ein Tarif-Update kurzfristig netzstützende Dienstleistungen angefordert werden. Dabei wird ein definierter Bereich der aktuellen Tariftabelle mit neuen Tarifen überschrieben, woraufhin das Fahrzeug mit einer Lastverschiebung oder dem Einspeisen elektrischer Energie in das Stromnetz reagiert. Engpässe in der lokalen Netzsituation können berücksichtigt werden, indem für definierte Zeitfenster eine netzseitige Leistungsbegrenzung an das Fahrzeug kommuniziert wird. Dieses reagiert mit einem neuen Ladefahrplan, dem nun die verringerte Leistungsgrenze zugrunde liegt. Ein weicher Lastabwurf kann durch den Entzug der Netzfregabe ebenfalls realisiert werden, in diesem Fall wechselt das Fahrzeug in einen Sleep-Modus und nimmt den Ladevorgang erst bei erneutem Erteilen der Netzfregabe wieder auf.

Die Netzintegration der Fahrzeuge erfolgt über die intelligente Ladestation des Fraunhofer ISE, welche die Authentifikation der Fahrzeuge, die Kommunikation der Tarife und die Erfassung der Energiewerte und Optimierereingangsgrößen realisiert. Die erfassten Werte werden über ein Webportal für den Fahrzeugnutzer detailliert graphisch aufbereitet, um den Mehrwert des Ladens mit kostenoptimalem Ladefahrplan zu veranschaulichen.



FLEXIBLER BETRIEB VON DEZENTRALEN ERZEUGERN IM SMART GRID

Steuerbare dezentrale Erzeuger im Stromverteilnetz können beim Ausbau fluktuierender erneuerbarer Erzeuger wesentlich zum Ausgleich von Angebot und Verbrauch sowie zur Erbringung von Netzdienstleistungen beitragen. Durch intelligente Betriebsführung kleinerer Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) gelingt es, diese Aggregate mit Strom-Wärme-Führung zu betreiben und bedarfsorientiert die Stromproduktion der variierenden Stromnachfrage anzupassen. Wir entwickeln anwendbare Lösungen (Hard- und Software) und testen diese in Simulationen, Labor- und Feldversuchen. Daneben entwickeln wir Geschäftskonzepte und beschreiben Anwendungsfälle und legislative Rahmenbedingungen für die Implementierung in der Praxis.

Thomas Erge, Dennis Freiberger, Raphael Hollinger, Christof Wittwer, Günther Ebert

Der Umbau der Stromversorgung in Deutschland ist mit dem Ausbau dezentraler Erzeugung verbunden. Teil hiervon sind hocheffiziente Blockheizkraftwerke (BHKW), die bisher primär zur Deckung von Wärmebedarf eingesetzt wurden. Strom entstand quasi als Abfallprodukt. Eine bedarfsorientierte Strombereitstellung unter Berücksichtigung der thermischen Restriktionen wird durch Speicher möglich. Die Vorhersage von sowohl thermischer als auch elektrischer Nachfrage ist hierbei Grundlage für den BHKW-Betrieb.

Der Einsatz unseres dezentralen Software- und Hardwareframeworks ermöglicht einen deckungsbeitragsoptimierten BHKW-Einsatz. Wie dies in der Praxis funktioniert, demon-

1 Das SmartEnergyLab am Fraunhofer ISE 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 thermischen und elektrischen Energieflüsse bieten wir eine Plattform für die Analyse, Bewertung und Entwicklung von Smart Homes und Smart Grid-Technologien für das Verteilnetz an.

trieren wir in verschiedenen Pilotprojekten. Gemeinsam mit den Wuppertaler Stadtwerken und der Bergischen Universität Wuppertal optimieren wir den Mikro-BHKW-Betrieb in Mehrfamiliengebäuden. Auf Basis von Tarifen, die den Bedarf im Gebäude und Verteilnetz sowie die globale Nachfrage widerspiegeln, werden die BHKW wirtschaftlich optimiert betrieben.

Eine andere Lösung realisieren wir im e-Energy Pilotprojekt »eTelligence – Modellregion Cuxhaven«. BHKW vermarkten hier ihren Strom an einem regionalen Marktplatz, wobei neben der Lieferung von Wirkleistung auch Optionen für innovative Zusatzdienstleistungen (z. B. Blindleistung) analysiert werden.

In unserem SmartEnergyLab bilden wir technische Szenarien und Betriebsführungsoptionen in einer einzigartigen Kombination aus Simulation und Realität nach. Somit können wir, noch vor dem Feldeinsatz, die Eignung der Komponenten für eine intelligente Betriebsführung im Smart Grid sicherstellen.



ENERGIEEFFIZIENZ DURCH INTELLIGENTE STROMZÄHLER

Die bundesdeutsche Klimaschutzpolitik hat intelligente Stromzähler als Instrument zur Steigerung der Energieeffizienz und als eine wichtige Komponente für das Lastmanagement im intelligenten Stromnetz eingebunden. Intelligente Messeinrichtungen sind Teil der Infrastruktur, durch die Erzeugung und Last systematisch aufeinander abgestimmt wird. Wir entwickeln Lösungen und testen diese in Simulationen, Labor- und Feldversuchen. Zudem begleiten wir Feldversuche sozialwissenschaftlich und technisch, um Auswirkungen auf Verbrauchsverhalten zu analysieren und die Entwicklung von neuen Produkten durch energiewirtschaftliche Kosten-Nutzen-Analysen zu unterstützen.

Dorika Fleissner, **Sebastian Gölz**, Thies Stillahn,
Christof Wittwer, Günther Ebert

1 Intelligente Zähler können helfen, Strom zu sparen. Im Projekt »Intelliekon« wurde u. a. untersucht, wie die Verbraucher mit den Rückmeldungen der Stromzähler umgehen.

Vom Einsatz intelligenter Zähler wurde in den letzten Jahren erwartet, dass sie den Haushalten beim Stromsparen helfen können. Das Fraunhofer ISE untersuchte mit Forschungspartnern, ob durch eine Rückmeldung des Stromverbrauchs über das Internet oder als traditioneller Papierbrief wirklich Strom gespart werden kann. In einem Feldversuch mit mehr als 2000 Haushalten untersuchte das Fraunhofer ISE den Umgang mit Feedback und gewann wertvolle Ergebnisse zum Stromsparen durch intelligente Zähler. Allein durch das Feedbackangebot verringerte sich der Stromverbrauch um 3,7 %. Haushalte mit einem zeitvariablen Tarif erzielten eine zusätzliche Einsparung von 6 %, die Lastverlagerung lag nur bei 2 %.

Besonders das Ergebnis zum zeitvariablen Tarif zeigt, dass durch geeignete Anreizsysteme ein Engagement der Haushalte beim Umbau der Stromversorgung in Deutschland weiterverfolgt werden kann und eine Verknüpfung mit der eigenen Stromerzeugung durch Photovoltaik oder Blockheizkraftwerke (BHKW) neue Produktoptionen für Versorgungsunternehmen, Dienstleister und PV-Anlagenbesitzer bietet. Das Fraunhofer ISE zeigt durch seine interdisziplinäre Forschung Wege auf, Effizienzbemühungen und Lastmanagement durch Dienstleistungen, z. B. eine Lasterkennung verschiedener Geräteklassen, zu unterstützen und neue Produktoptionen aufzuzeigen.



2 Mit eigenen Lösungen und methodisch anspruchsvoller Begleitforschung bietet das Fraunhofer ISE innovative Smart Grid-Lösungen sowie eine unabhängige Evaluation der energetischen Effekte bei Privat- und Gewerbekunden und der energiewirtschaftlichen Potenziale (Screenshot der Intelliekon-Website).

www.intelliekon.de
www.openmuc.org



SPEICHERSTUDIE FÜR EINE REGENERATIVE STROMVERSORGUNG

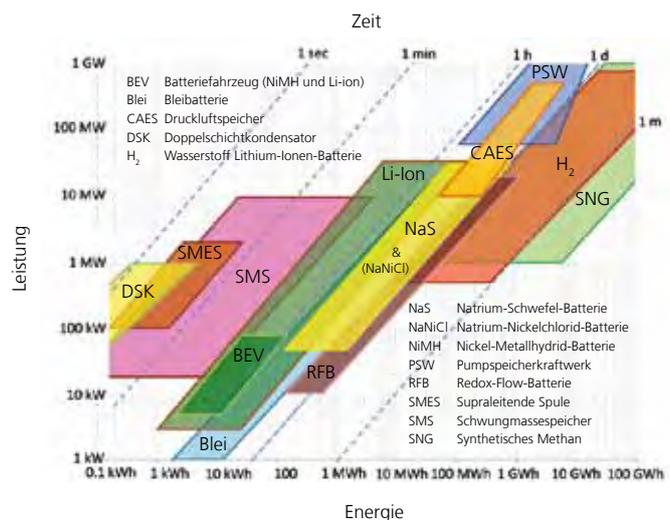
Durch den zunehmenden Anteil von erneuerbarem Strom aus Photovoltaik und Windkraft wird in Deutschland und weltweit diskutiert, welche und wie viel elektrische Energiespeicher in das öffentliche Stromversorgungsnetz integriert werden müssen, um z. B. Schlechtwetterperioden oder Windflauten auszugleichen. Das Fraunhofer ISE hat im Auftrag der internationalen elektrotechnischen Kommission IEC und in Zusammenarbeit mit dem japanischen Stromversorger Tepco das IEC White Paper »Electrical Energy Storage« erstellt. Diese Studie beschreibt die Aufgaben, die Technologien, den Normungsbedarf, die aktuellen und die zukünftigen Anwendungsfälle und Märkte von elektrischen Energiespeichern weltweit.

Georg Bopp, Matthias Merkle, Tom Smolinka, Simon Schwunk, Günther Ebert

Heutzutage gleichen elektrische Energiespeicher (EES) in Stromnetzen sowohl auf der Erzeuger- als auch auf der Verbraucherseite kurzfristige (0,1 s–15 min) und mittelfristige (15 min–12 h) Lastspitzen aus. Bisher werden dafür hauptsächlich Schwungmassespeicher, Wasserkraftwerke und sehr vereinzelt Blei-, Natrium-Schwefel- und Lithium-Ionen-Batterien eingesetzt. Mit zunehmendem Einsatz von Photovoltaik und Windkraft nimmt auf Erzeugerseite die Schwankung zu. Durch mehrere Studien wurde in den letzten zwei Jahren nachgewiesen, dass zum Ausgleich dieser Schwankungen weltweit verstärkt erneuerbare Energiesysteme benötigt werden.

So wird z. B. 2030 in Deutschland bei einem regenerativen Stromanteil von 60–80 % eine EES-Kapazität von bis zu 8000 GWh prognostiziert. Dies übersteigt die Speicherkapazität der heutigen deutschen Pumpspeicherkraftwerke um das 200fache. Ihr weiterer Ausbau ist jedoch aufgrund von topographischen Einschränkungen in Deutschland nur noch

- 1 Zellstapel einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie.
- 2 Lithium-Ionen-Batteriemodul mit (elektronischem) Batteriemangement.



- 3 Typische Leistungs-, Energie- und Entladezeitbereiche von verschiedenen EES. Die Lithium-Ionen-Batterie ist im Gegensatz zur Natrium-Schwefel- und Redox-Flow-Batterie sowohl zur Kurzzeit- wie zur mittelfristigen Speicherung geeignet.

sehr begrenzt möglich. Als Alternative besonders im GWh- bis TWh-Bereich bieten sich Druckluftspeicher, Wasserstoff oder synthetisches Methan an. Bei allen drei Speichern werden die jeweiligen Gase in unterirdischen Kavernen gespeichert. Ferner bietet das Erdgasnetz mit seiner nominellen Speicherkapazität von 200 000 GWh bereits heute die Möglichkeit, große Mengen an Wasserstoff oder Methan jenseits des prognostizierten Bedarfs für 2030 beizumischen. Als Kurzzeit- und mittelfristige Speicher werden weiterhin die Wasserkraftwerke und viele zusätzliche elektrochemische Speicher wie Natrium-Schwefel-, Lithium-Ionen- oder Redox-Flow-Batterien benötigt.



LITHIUM-IONENBATTERIESYSTEM FÜR ELEKTROFAHRZEUGE

Der zukünftige Markterfolg von Elektrofahrzeugen hängt ganz entscheidend von der Leistungsfähigkeit und Qualität der verwendeten Fahrzeugbatterien ab. Die Auswahl des richtigen Zelltyps – heute meist Zellen in Lithium-Ionen-Technologie – ist dabei nur der erste Schritt. Genauso wichtig ist die Konzeption des Batteriesystems, das aus vielen zusammengeschalteten Zellen besteht, die mechanisch, elektrisch, thermisch und informationstechnisch in das Fahrzeug eingebunden werden müssen. Hierfür bedarf es eines crachsicheren Gehäuses, eines effizienten Kühlsystems und eines auf die Zelltechnologie und die Anwendung optimierten Überwachungssystems. Ziel ist es, den Energieverbrauch dieser Zusatzfunktionen möglichst niedrig zu halten, um die Reichweite der Fahrzeuge nicht zu reduzieren.

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

Im Rahmen der »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität« leitete das Fraunhofer ISE das Teilprojekt »Batteriesystem«, in dem mit anderen Fraunhofer-Instituten ein neues Batteriesystem entwickelt und aufgebaut wurde.

Die Steuerungselektronik zur Überwachung und Steuerung stellt die Intelligenz dieses Batteriesystems dar und wurde dezentral angelegt. Jedes Modul hat eine kleine energiesparende Platine, welche die Zellspannungen und -temperaturen überwacht. Die Platine erkennt Zellfehler wie Überladungen und detektiert den Zustand jeder einzelnen Zelle. Dies geschieht z. B. bei der Alterungserkennung mit Genauigkeiten von besser als einem Prozent über einen weiten Temperaturbereich.

1 Batteriemodul, bestehend aus zwölf Zellen à 40 Ah. Die Flüssigkeitskühlung über Kühlplatten erlaubt eine flächige Kühlung der Zellen. Das Verfahren ermöglicht eine sehr homogene Temperaturverteilung.

2 Aufgeklapptes Batteriesystem für Elektrofahrzeug mit einer Kapazität von 28 kWh. Die Nennspannung liegt bei 346 V. Das Modulkonzept erlaubt einen vereinfachten Aufbau und eine leichte Reparatur des Batteriesystems.

Die ermittelten Zustands- und Messwerte der einzelnen Modulelektroniken werden von einem zentralen Batteriemanagement ausgewertet. Dieses bestimmt daraus den Gesamtzustand der Batterie, erkennt Fehler, fängt diese ab und übernimmt die Kommunikation auf dem Fahrzeugbus. Im Rahmen modellbasierter Regelung bestimmen Modelle die maximalen Ströme, um eine schnellere Regelung und bessere Ausnutzung des Batteriepacks zu ermöglichen.

Da Pouchbag-Zellen verwendet wurden, die als Ableiter Alu- und Kupfertabs besitzen, stellt die Verbindungstechnik eine Herausforderung dar. Die Verbindungen zwischen den Zellen sollten möglichst verlustarm, robust und langlebig sein. Verfahren zum leitfähigen Kleben, Ultraschallschweißen und Laserschweißen wurden entwickelt und getestet. Das Laserschweißen erzielte sehr gute Ergebnisse.

Die »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität« wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.



1

DYNAMISCHER BETRIEB EINER PV-VERSORGTEN UMKEHROSMOSEANLAGE

2011 konnten wir unsere Erfahrungen im Bereich der photovoltaischen Systemtechnik durch zwei Umkehrosmoseanlagen im Feldtest auf Zypern erweitern. Im Rahmen des Feldtests arbeitet das Projektkonsortium aus Deutschland eng mit dem Cyprus Institute zusammen. Es soll ein dynamischer Anlagenbetrieb zur Meerwasserentsalzung demonstriert werden. Bisher wurden Umkehrosmoseprozesse in stationärer Betriebsweise gefahren. Hierfür waren bei einer rein photovoltaischen Energieversorgung ohne Netzanschluss bislang große Batteriespeicher notwendig. Von uns entwickelte Betriebsführungsstrategien und ein innovatives Anlagenkonzept machen Batterien in dieser Anwendung zukünftig überflüssig.

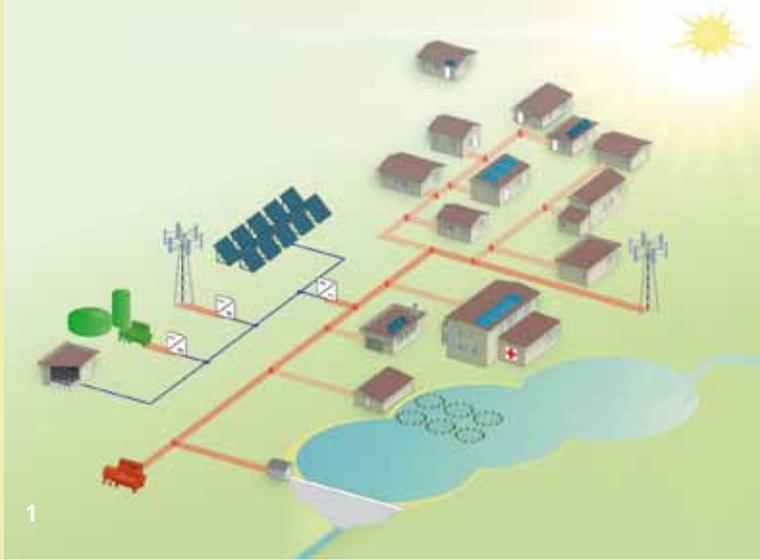
Julian Anhalt, Marcel Klemm, Sebastian Rauscher, Alexander Schies, Matthias Vetter, **Joachim Went**, Günther Ebert

1 PV-Generator und zwei Seecontainer mit je einer Umkehrosmoseanlage zur Entsalzung von Meerwasser. Im linken Container befindet sich eine Anlage für etwa 150 l entsalztes Wasser pro Tag, im rechten Container eine Anlage für etwa 5 m³ pro Tag. Standort ist das Testgelände des Cyprus Institute »Pentakomo Lab«, an der Mittelmeerküste.

Bislang stellt der rasant wachsende Anteil der Meerwasserentsalzung zur Wassergewinnung kein zukunftsfähiges Modell dar, weil der Energiebedarf überwiegend durch die Nutzung fossiler Energieträger gedeckt wird. Damit die Meerwasserentsalzung, die vielerorts bereits heute für die Wasserversorgung unverzichtbar ist, zukünftig Bestandteil einer nachhaltigen Wasserversorgung werden kann, muss die solare Energieversorgung und der Bau von verbrauchernahen, modernen Anlagen verschiedenster Leistungsklassen vorangetrieben werden. Insbesondere für Kleinanlagen haben bisher entsprechende Energierückgewinnungseinheiten gefehlt, um diese dynamisch und energieeffizient betreiben zu können.

Das Team des Fraunhofer ISE hat mit der Inbetriebnahme auf Zypern zwei innovative Anlagenkonzepte mit hoher Energieeffizienz umgesetzt. Der Anlagenprozess kann jeweils dynamisch gefahren werden und die Leistungsaufnahme der momentan zur Verfügung stehenden Einstrahlung angepasst werden. Neben speziellen verfahrenstechnischen Komponenten wird dies durch eine besondere Betriebsführungsstrategie erreicht, die auch im Teillastbereich und bei An- und Abfahrvorgängen gute Wirkungsgrade ermöglicht. Zukünftig können so photovoltaisch betriebene Entsalzungsanlagen ohne elektrischen Energiespeicher realisiert und auch wirtschaftlich interessanter werden.

Das Projekt wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Programm »Inno-Net« sowie unseren Partnerfirmen Pairan Elektronik GmbH, IBC Solar AG, Gather Industrie GmbH, MAT Plasmatec GmbH, Katadyne Produkte AG und Technisches Büro Becker (TBB) unterstützt.



SYSTEMTECHNIK FÜR DIE AUTARKE ENERGIEVERSORGUNG DER ZUKUNFT

Die Mehrheit der 1,44 Milliarden Menschen ohne Zugang zu Elektrizität lebt im Sonnengürtel der Erde mit einem unerschöpflichen Potenzial an Solarenergie. Durch immer günstigere Solar-PV-Generatoren sind solar versorgte Inselssysteme eine bessere Alternative zu Dieselgeneratoren geworden. Um die gestiegenen Anforderungen an Wirkungsgrad, Modularität und Versorgungsleistung zu erfüllen, entwickelt das Fraunhofer ISE Systemtechnik für die autarke Energieversorgung der nächsten Generation. Dies umfasst modernste Leistungselektronik, Batterietechnologie sowie Systemintelligenz.

Nils Armbruster, Georg Bopp, Johannes Dréwniok, Michael Eberlin, Max Jung, Brisa Ortiz, Severin Philipp, **Florian Reiners**, Olivier Stalter, **Alexander Schies**, Simon Schwunk, Matthias Vetter, Jakob Wachtel, Günther Ebert

Aufgebaut ist die autarke Energieversorgungslösung mit einem bidirektionalen Inselwechselrichter, dieser ist über einen Hochvoltbus an ein hybrides Batteriesystem und ein PV-Batterieladegerät angeschlossen. Die leistungselektronischen Komponenten erreichen dabei Wirkungsgrade, die es in diesem Anwendungsbereich bisher nicht gibt. Eine weitere Innovation ist das hybride Batteriesystem, das erstmals die Vorteile einer hohen Zyklenfestigkeit der Lithiumbatterie mit den Kostenvorteilen der Bleibatterie vereint. Abgerundet wird das System mit einem offenen Kommunikationsprotokoll, das alle Komponenten mit dem zentralen Energiemanagement zur Systemoptimierung verbindet.

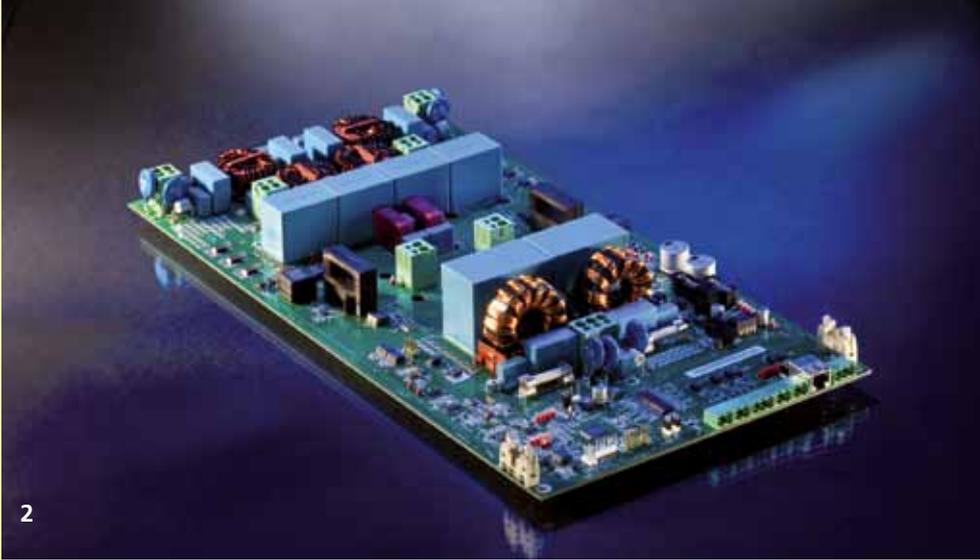
Der bidirektionale Inselwechselrichter hat eine Nennleistung von 120 kVA. Während herkömmliche Inselwechselrichter nahezu ausschließlich mit Batteriespannungen kleiner als 60 V arbeiten, beträgt diese hier bis zu 1000 V. Somit kann auf Transformatoren und Hochsetzsteller verzichtet werden,

¹ Auf einem Hochvolt-Gleichstrombus werden das hybride Batteriesystem und die PV-Anlage angeschlossen. In Zukunft sollen auch weitere Energieerzeuger wie Windkraft und Biomasseanlagen integriert werden können. Ein Wechselrichter erzeugt einen dreiphasigen Wechselstrom. Optional kann auch ein Dieselgenerator in das Inselssystem integriert werden.

was zusammen mit einer innovativen Dreipunkttopologie zu Wirkungsgraden von über 98 % führt. Hiervon sind übliche Inselwechselrichter weit entfernt. Um Kosteneffizienz, Leistungsdichte und Lebensdauer zu maximieren, wurde die Leistungselektronik auf Basis einer Dickkupferplatte realisiert.

Batteriesysteme tragen immer noch wesentlich zu den Lebensdauerkosten von netzunabhängigen Stromversorgungen bei. Durch die Kopplung einer Bleibatterie mit einer Lithium-Ionen-Batterie soll die Lebensdauer deutlich erhöht werden, ohne die Investitionskosten durch teurere Lithium-Ionen-Batterien stark ansteigen zu lassen. Die Lithium-Ionen-Batterie macht viele Zyklen und wird immer genutzt, sobald Energie in dieser Batterie gespeichert ist. Im Sommer übernimmt diese Batterie einen großen Teil der Zyklen, die Bleibatterie befindet sich immer im vollgeladenen Zustand. Im Winter werden dadurch wiederum häufigere Vollladungen erreicht. Simulationen über ein Jahr prognostizieren einen Kapazitätsverlust von 12 % bei einem reinen Bleibatteriesystem gegenüber 4 % bei einem hybriden Batteriesystem.

Das Photovoltaik-Hochvolt-Batterieladegerät hat eine Nennleistung von 51 kW und bietet mit seinen sechs MPP-Trackern und seinem PV-Eingangsspannungsbereich von 350–1200 V eine Flexibilität bei der Auslegung des Solargenerators, die



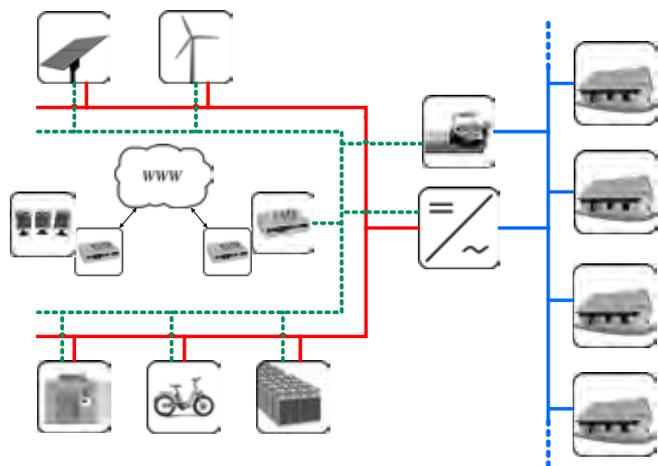
2

2 Leiterkarte eines der insgesamt drei baugleichen Module des Photovoltaik-Hochvolt-Batterieladegeräts. Auf ihr sind sowohl die Leistungselektronik als auch die gesamte Steuerung inklusive des digitalen Signalprozessors auf engstem Raum untergebracht.

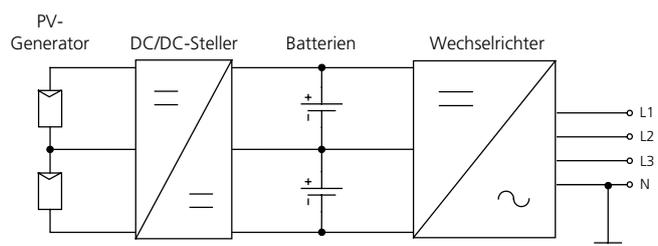
bisher nirgendwo verfügbar ist. Um den Systemwirkungsgrad zu maximieren, wurden die neuesten Generationen von Superjunction-MOSFETs und Siliciumcarbid-Dioden verwendet und auf den Einsatz von Transformatoren verzichtet. Erste Messungen konnten vielversprechende Wirkungsgrade von über 98,5 % bestätigen. Die hohe Integrationsdichte von Leistungs- und Logikteil auf einer Leiterkarte verspricht des Weiteren geringere Fertigungskosten.

Alle Systemkomponenten kommunizieren über das offene CANopen Protokoll (Applikationsprofil CiA 454 »Energy Management Systems«) mit dem zentralen Energiemanagementsystem. Das Energiemanagement sorgt dabei für eine Gesamtoptimierung des Systems. Es stellt die Versorgungssicherheit auch an Tagen niedriger PV-Erträge durch Zu- und Abschalten von Zusatzgeneratoren und Lasten sicher. Mit Wettervorhersagen können Fahrpläne zum optimierten Betrieb von Erzeugern und schaltbaren Lasten erstellt werden.

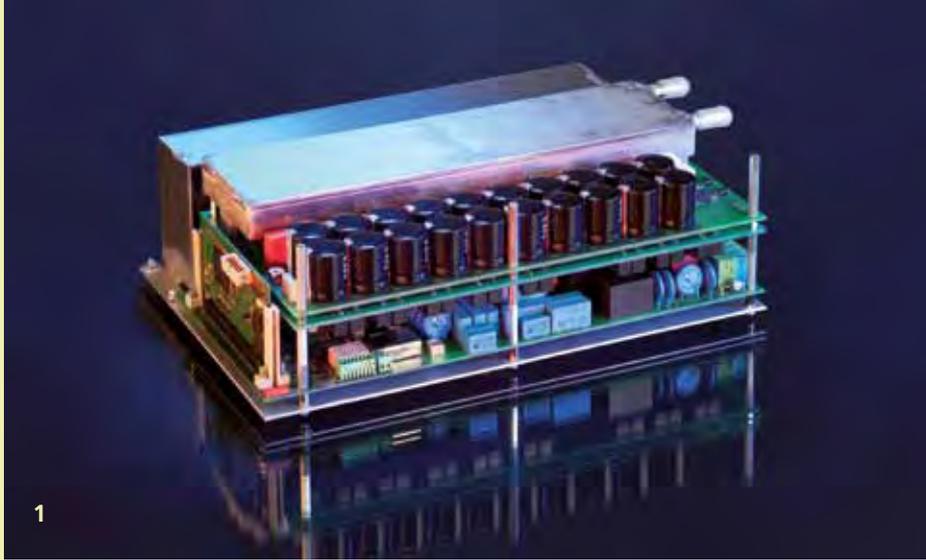
Das Projekt »Innovative Photovoltaik-Hybrid-Systemtechnik für die Dorfstromversorgung« (InnoSystem) wird durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert. Projektpartner ist die KACO new energy GmbH.



3 Um das Energiemanagement mit optimierter Betriebsführung von Zusatzernzeugern und einem intelligenten Lastmanagement zu ermöglichen, bedarf es einer geeigneten Kommunikationsinfrastruktur. In grün ist die von den Leistungsschienen unabhängige Kommunikationsleitung für das CANopen Protokoll dargestellt.



4 Blockschaltbild des Inselsystems. Eine innovative mittelpunktgeerdete Hoch-/Tiefsetzsteller-topologie bietet große Flexibilität bei der Auslegung von Solargenerator und Batterie.



HOCHEFFIZIENTES UND KOMPAKTES LADEGERÄT

Die zunehmende Anzahl batterieelektrischer Fahrzeuge benötigt in Zukunft eine breite Auswahl an Lademöglichkeiten. Die Kernkomponente für das Laden der Traktionsbatterie ist ein mobiles Ladegerät im Fahrzeug bzw. ein stationäres Ladegerät in einer Ladesäule. Das Ladegerät verbindet die Hochvolt-Traktionsbatterie des Fahrzeugs mit dem Stromnetz. Im Rahmen der »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität« wurde ein transformatorloses, dreiphasiges Ladegerät mit höchstem Wirkungsgrad und hoher Leistungsdichte entwickelt.

Bruno Burger, Benriah Goeldi, **Stefan Reichert**,
Stefan Schönberger, Günther Ebert

Bislang eingesetzte Ladegeräte ermöglichen lediglich die Ladung der Batterie mit geringen Ladeleistungen. Des Weiteren können diese Ladegeräte keine netzstützenden Funktionen erbringen. Am Fraunhofer ISE legten wir daher den Fokus auf die Entwicklung eines bidirektionalen Ladegeräts, mit dem verschiedene Systemdienstleistungen angeboten werden können. Das Ladegerät ist in der Lage, Strom mit einem beliebigen Phasenwinkel zur Netzspannung ($\cos \varphi$) einzuspeisen bzw. zu beziehen. Dadurch lassen sich Systemdienstleistungen anbieten, z. B. Blindleistungsaustausch und die Bereitstellung von Regelenergie und -leistung.

Durch den Verzicht auf eine galvanische Trennung zwischen Batterie- und Netzseite konnte das Ladegerät hinsichtlich der Leistungsdichte und des Wirkungsgrads optimiert werden. Ohne den sonst notwendigen Hochfrequenz-Transformator und ohne zusätzliche Halbleiter und Ansteuerlektronik reduzieren sich Gewicht, Verluste und Kosten. Durch einen Stapelaufbau der Platinen, der Halbleitermodule und des Kühlkörpers wurde eine kompakte Bauweise der Leistungselektronik erreicht. Die kompakte Anordnung von Bauteilen und Komponenten erfordert eine Optimierung mit Hilfe einer 3D-Darstellung. In dieser können aktive und passive Bauteile, elektronische Komponenten und Platinen aufeinander abgestimmt und platzsparend positioniert werden.

Im Bereich der PV-Einspeisewechselrichter wird seit Längerem der Einsatz von Leistungstransistoren mit neuem Halbleitermaterial, wie SiC-MOSFETs und SiC-JFETs, diskutiert und erforscht. Ein Vorteil dieser neuen Halbleitermaterialien sind die geringen Verluste. Aufgrund geringer Schaltverluste lässt sich die Taktfrequenz des Ladegeräts ohne allzu große Einbußen beim Wirkungsgrad erhöhen.



2

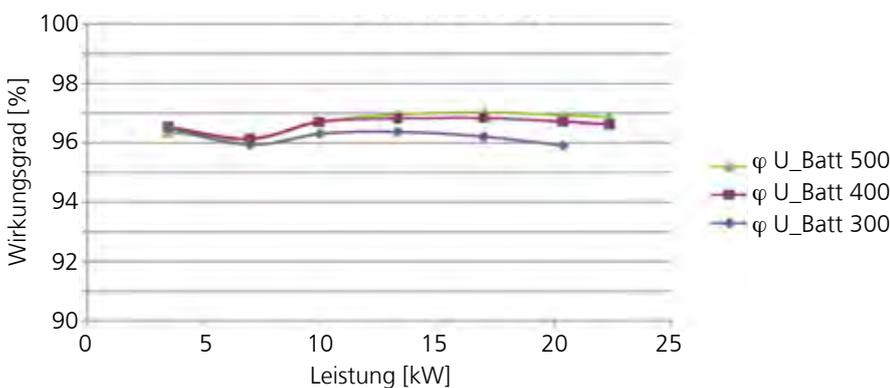
In dem am Fraunhofer ISE entwickelten Ladegerät kommen SiC-JFETs zum Einsatz. Aufgrund der hohen Taktfrequenz von 80 kHz konnte die Größe der induktiven Bauteile auf der Netz- sowie Batterieseite drastisch minimiert werden. Das Ladegerät mit einem hart schaltenden, zweistufigen Wandlerkonzept erreicht trotz der hohen Taktfrequenz einen maximalen Wirkungsgrad von 97%. Die Spannungs- und Leistungsabhängigkeit des Wirkungsgrads ist sehr gering. Dies zeigt sich dadurch, dass der Wirkungsgrad im Leistungsbereich von 4 kW bis 20 kW sowie im gesamten Batteriespannungsbereich von 300 V bis 500 V zwischen 96 % und 97 % liegt.

Die hohe Taktfrequenz stellt eine große Herausforderung an die digitale Regelungstechnik dar. Deshalb haben wir am Fraunhofer ISE eine extrem schnell arbeitende Reglerplatine für das Ladegerät entwickelt. Diese ist in der Lage, Ströme und Spannungen hochaufgelöst mit einer Abtastfrequenz von 80 kHz zu erfassen, regelungstechnisch zu verarbeiten und die pulsweitenmodulierten Signale für die Ansteuerung der Leistungstransistoren zu berechnen.

- 1 *Bidirektionales Ladegerät mit 22 kW Leistung. Der hohe Wirkungsgrad von 97 % und die hohe Leistungsdichte von 2,8 kW/l werden durch den Einsatz von SiC-Halbleitern erreicht.*
- 2 *Platine mit digitalem Signal-Prozessor (DSP) zur Regelung und Betriebsführung eines leistungselektronischen Wandlers.*

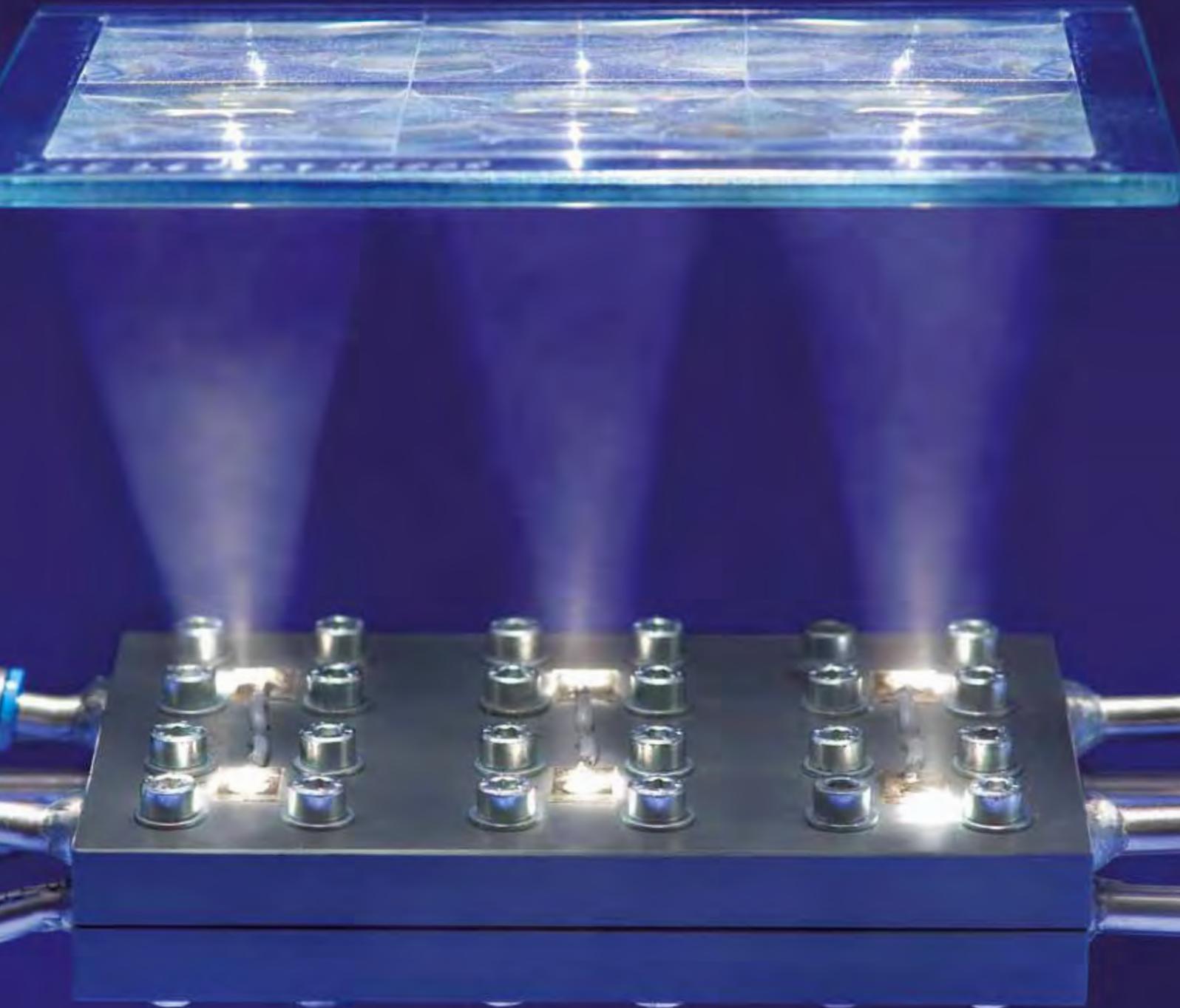
Das Ladegerät arbeitet bidirektional und kann sowohl Energie aus dem Netz beziehen als auch die in der Batterie gespeicherte Energie bei Bedarf in das Netz zurückspeisen. Dadurch kann es einerseits Strom aus fluktuierend einspeisenden erneuerbaren Energien, z. B. der Photovoltaik oder der Windenergie, in der Batterie speichern und andererseits bei geringer Erzeugung aus erneuerbaren Energien das Netz stützen. Die Elektromobilität bietet damit die Möglichkeit, die Batterien der Fahrzeuge dem Stromnetz als Speicher zur Verfügung zu stellen. Besonders interessant ist hierbei die große kumulierte Leistung der bidirektionalen Ladegeräte, die es ermöglicht, kurzzeitige Leistungs- und Frequenzschwankungen im Stromnetz auszugleichen.

Die »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität« wurde durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.



- 3 *Wirkungsgradverlauf des dreiphasigen, bidirektionalen Ladegeräts in Abhängigkeit von der Leistung und verschiedenen Batteriespannungen.*

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, sogenannten Kohlenwasserstoffen oder Alkoholen.

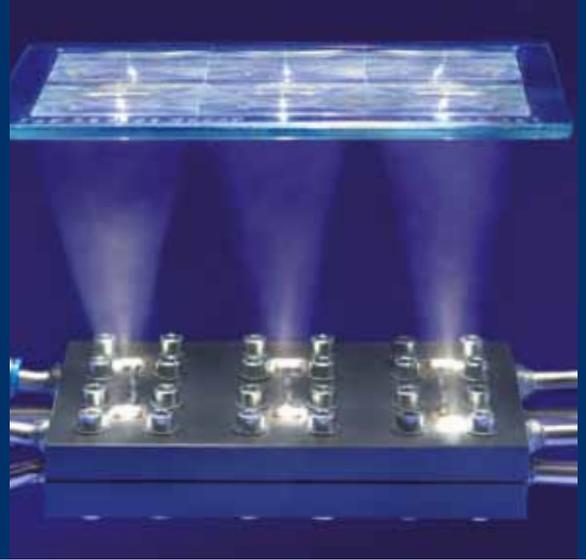
Wasserstoff ist zwar keine Energiequelle, als universeller Energieträger wird er aber ein wichtiger Baustein einer künftigen nachhaltigen Energiewirtschaft sein. Langfristig kann Wasserstoff beispielsweise zeitlich fluktuierende erneuerbare Energie, z. B. in Kavernen oder im vorhandenen Gasnetz, zwischenspeichern, so dass alle gewünschten Energiedienstleistungen mit der gewohnten Zuverlässigkeit bereitgestellt werden. Das Anwendungspotenzial von Wasserstoff ist sehr groß: In der dezentralen Energieversorgung können Brennstoffzellen Wärme und Strom aus Erdgas mit bis zu 90 Prozent Gesamtwirkungsgrad erzeugen. Brennstoffzellen dienen in mobilen Anwendungen zusammen mit Elektromotoren als schadstofffreie Antriebsaggregate für Automobile, LKWs und Busse. Außerdem können Brennstoffzellen in Auxiliary Power Units (APU) für die Bordnetzstromversorgung sorgen. Schließlich eignen sich Mikrobrennstoffzellen wegen der hohen Energiedichte von Wasserstoff oder Alkohol als Ergänzung zu wiederaufladbaren Batterien in der netzfernen Stromversorgung oder in portablen Elektrogeräten.

Im Geschäftsfeld »Wasserstofftechnologie« erforschen wir innovative Technologien zur Gewinnung und hocheffizienten Umwandlung von Wasserstoff in Strom und Wärme. Zusammen mit unseren Partnern aus Industrie und Wissenschaft entwickeln wir Komponenten bis hin zu kompletten Systemen, überwiegend für netzferne, portable und mobile Anwendungen.

Wir entwickeln Reformier- und Pyrolysesysteme 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 und Schwefel 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, erweitern wir unser Portfolio mit Blick auf die Umwandlung und Nutzung von Biomasse. So haben wir eine Technikumsanlage zur Holzvergasung in Betrieb genommen, mit der wir ein neues, am Fraunhofer ISE mitentwickeltes Verfahren demonstrieren. Außerdem nutzen wir Pyrolyseverfahren zur Erzeugung synthetischer Kraftstoffe aus Biomasse und konventionellen Brennstoffen.

Für die Wasserstoffgewinnung aus Wasser realisieren wir geregelte 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. Anfang 2012 eröffnen wir eine öffentliche Wasserstoff-Tankstelle mit solarer Wasserstoffherzeugung zur Betankung von Brennstoffzellen-Fahrrädern, -PKW und -Bussen.

Als effiziente, umweltfreundliche, geräusch- und wartungsarme Energiewandler im Leistungsbereich von mW bis fünf Kilowatt setzen wir auf Membranbrennstoffzellen inklusive deren Versorgung mit Wasserstoff oder Methanol. Zur Charakterisierung solcher Brennstoffzellen haben wir unser Testzentrum Brennstoffzelle eingerichtet. Darüber hinaus kooperieren wir mit dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut zur Beratung für eine normgerechte Entwicklung, zur normgerechten Prüfung und zur Zertifizierung von Brennstoffzellen und -systemen.

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, Notstromversorgungen und für portable elektronische Geräte.

HyCon(C)-Prototyp zur Erzeugung solaren Wasserstoffs direkt aus Sonnenlicht durch Elektrolyse von Wasser. Das Modul ist aufgebaut aus sechs III-V-Solarzellen die direkt gekoppelt sind mit sechs PEM-Elektrolyse-Zellen und erlaubt die direkte Erzeugung von Wasserstoff mit sehr hohen Wirkungsgraden.

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

Wasserstofferzeugung 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



AUFBAU EINER 700 BAR WASSERSTOFF-TANKSTELLE MIT ELEKTROLYSE

Zur Intensivierung unserer Forschung und Entwicklung im Bereich der nachhaltigen Mobilität sowie der Energiespeicherung haben wir auf dem Gelände des Fraunhofer ISE eine innovative 700 bar Wasserstofftankstelle mit eigener Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse sowie Stromerzeugung durch eine PV-Anlage aufgebaut. Die Tankstelle ist öffentlich zugänglich und stellt ab März 2012 umweltfreundlichen Kraftstoff für 700 bar Wasserstoff-PKWs bereit. Die Anlage bietet neben ihrer Grundfunktionalität vielfältige Möglichkeiten und Voraussetzungen für weitere Projekte im Bereich der Wasserstoffmobilität, des Demand-Side-Management und der Wasserstoffeinspeisung in das Erdgasnetz. Durch die produktreife Hardware können reale Erfahrungen und Erkenntnisse jenseits des Labors gewonnen werden.

Ulf Groos, Tom Smolinka, **Christopher Voglstätter**,
Christopher Hebling

Im Zuge der Umstellung unserer Energieversorgung auf regenerative und klimafreundliche Energien stellt die Mobilität eine nicht abschließend gelöste Herausforderung dar. Verschiedene Ansätze der CO₂-neutralen Mobilität werden derzeit in Fachkreisen diskutiert. Neben Biokraftstoffen und der reinen batterieelektrischen Elektromobilität mit ihren jeweiligen Nachteilen ist auch die Elektromobilität mit Wasserstoff aus regenerativen Energien und Brennstoffzellen eine der diskutierten Lösungen.

Die Wasserstoffmobilität hat im Vergleich zu den anderen Ansätzen das Problem einer noch nicht verfügbaren Infrastruktur: das Henne-Ei-Problem. Verschiedene Bestrebungen von staatlicher und industrieller Seite zielen darauf hin, bis zum Roll-Out der ersten Wasserstofffahrzeug-Kleinserien 2014 und darüber hinaus in Deutschland eine flächendeckende

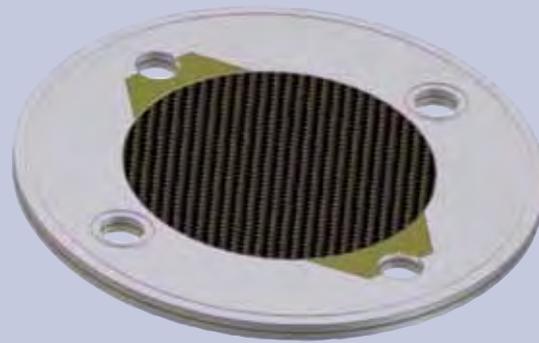
1 *Betankung eines Wasserstofffahrzeugs mit Wasserstoff.*

Wasserstoffinfrastruktur aufzubauen. Mit dem Aufbau einer Wasserstofftankstelle in Freiburg werden ein wichtiger Eckpunkt der Tankstelleninfrastruktur und ein Korridor in die Schweiz und nach Frankreich bereit gestellt.

Die ab März 2012 öffentlich zugängliche Tankstelle zeichnet sich durch erreichbare Fülldrücke von 350/700 bar aus und erzeugt den Wasserstoff in einer integrierten Elektrolyseanlage mit einem State-of-the-Art PEM-Elektrolyseur. Die benötigte elektrische Energie wird mit einem möglichst hohen Deckungsgrad durch eine eigene PV-Anlage bereit gestellt und durch regenerativen, zertifizierten Ökostrom ergänzt.

Die Tankstelle dient neben der Betankung von PKWs auch als Basis für diverse mobilitätsrelevante und zukunftsweisende Forschungsthemen. So wurden bei der Errichtung der Anlage auch die Voraussetzungen für den versuchsweisen Betrieb der Anlage im Smart Grid und für weitere Projekte im Bereich der Wasserstoffmobilität, der wasserstoffbetriebenen Kleintraktion und der Wasserstoffeinspeisung in das Erdgasnetz eine Forschungsplattform geschaffen. Durch die produktreife Hardware und die Möglichkeit der Bilanzierung der Anlage sollen reale Erfahrungen und Erkenntnisse jenseits des Labors gewonnen werden.

Das Vorhaben wurde durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg mit Mitteln aus dem Landesinfrastrukturprogramm und aus dem Nationalen Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie (NIP) durch die NOW GmbH (Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie) unterstützt.



1

NEUER HOCHDRUCK-ELEKTROLYSESTACK ZUR EFFIZIENTEN H₂-PRODUKTION

Wasserstoff wird in Zukunft als vielseitiger und speicherbarer Energieträger für ein breites Anwendungsspektrum genutzt werden. Vor allem PEM-Elektrolyseure eignen sich zur effizienten Wasserstoffproduktion in Kopplung mit erneuerbaren Energien. In einem von der Europäischen Union geförderten Projekt entwickeln wir aktuell einen kostengünstigen Hochdruck-Stack für die PEM-Elektrolyse. Der neuartige Stack besteht größtenteils aus für die Massenfertigung geeigneten Komponenten mit mehreren technischen Innovationen, z. B. neuen Elektroden, einer neuen Zellrahmenkonstruktion und gespritzten Dichtungen. Der Stack soll einen Wirkungsgrad von mindestens 75 % (LHV) und eine Lebensdauer von mehr als 40 000 Stunden aufweisen.

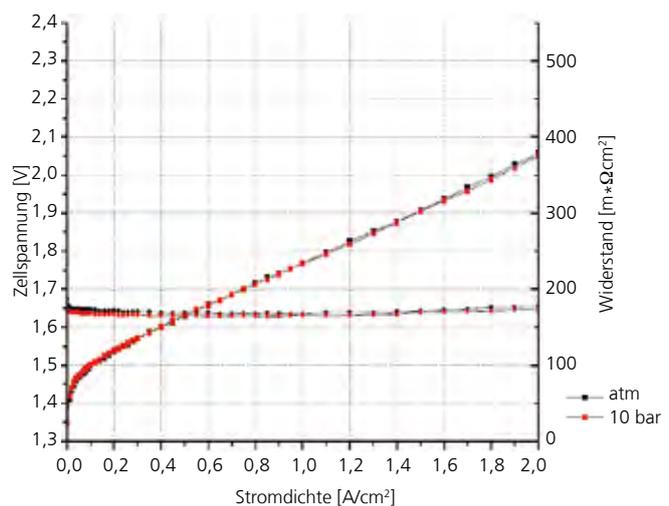
Beatrice Hacker, **Emile Tabu Ojong**, Sebastian Rau, Tom Smolinka, Christopher Hebling

PEM-Elektrolyseure bieten eine hervorragende Möglichkeit, Wasserstoff sowohl für mobile als auch für stationäre Anwendungen effizient und flexibel zu produzieren. Trotz neuester Fortschritte in der PEM-Technologie gibt es jedoch auf dem Weg zur Kommerzialisierung noch Herausforderungen, z. B. hohe Material- bzw. Systemkosten, unzureichende Lebensdauer und teure Produktionsmethoden.

In Rahmen des EU-Projekts »NEXPEL« adressieren wir mit europäischen Partnern aus Forschung und Industrie diese Herausforderungen durch gezielte Weiterentwicklung von Materialien und Komponenten für den Einsatz in Hochdruck-Elektrolyseuren.

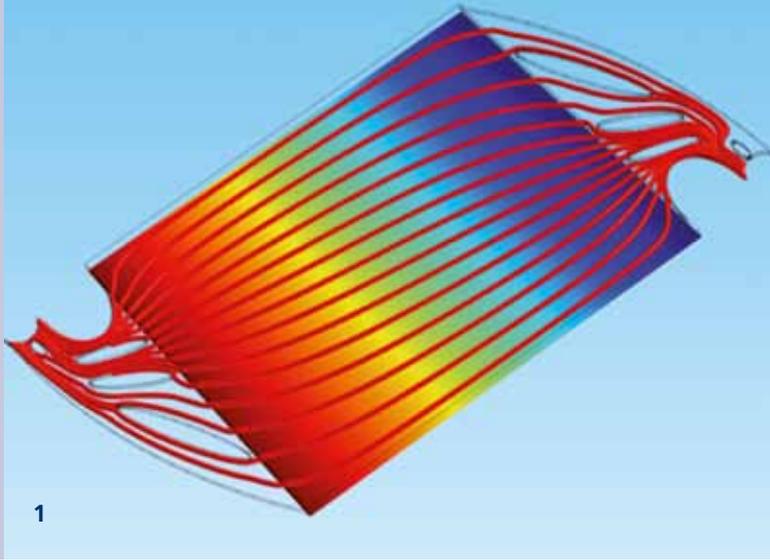
Dafür wird ein neues Stackdesign zur Verbesserung des herkömmlichen Konzepts entwickelt. Um die Produktionskosten zu verringern, wird etwa auf das Fräsen von Strömungsstruk-

1 Konzept des neuen Stackdesigns, das aktuell in Shortstacks am Fraunhofer ISE untersucht wird. Links ist die Halbzelle der Sauerstoffseite und rechts die der Wasserstoffseite zu sehen.



2 Typische Leistungsdaten der bevorzugten Materialkombination, gemessen in einer 25 cm² Laborzelle bei 80 °C und 10 bar.

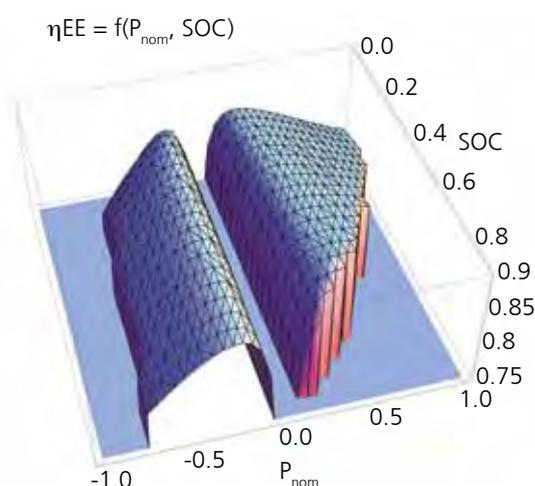
turen (Flow Field) in den Bipolarplatten verzichtet (Abb. 1). Anhand von Kostenmodellen und Experimenten zum Korrosionsverhalten von Bipolarplatten und Stromverteilern haben wir geeignete Materialien für die Zellkonstruktion ausgewählt. Zur Optimierung des Stromverteilers wurde ein Zwei-Phasen-Strömungsmodell benutzt. Durch eine spezielle Schutzschicht wird darüber hinaus die Wasserstoff-Versprödung der Kathode minimiert. Um die Dichtung des Hochdrucksystems (50 bar) zu optimieren, werden anstelle des herkömmlichen Taschenkonzepts der Bipolarplatte Zellrahmen aus preiswertem Kunststoff mit applizierter Spritzdichtung verwendet, die sowohl die Dichtung als auch die Zu- und Ableitung aller Fluidströme ermöglichen.



SIMULATIONSGESTÜTZTE AUSLEGUNG VON REDOX-FLOW-BATTERIEN

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 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. Im Rahmen des Projekts »1 MWh Redox-Flow Netzspeicher« entwickeln wir optimierte Zellstapel mit Leistungen von 1, 5 und 35 kW_{el} für die Anwendung in Inselfsystemen oder auch netzgekoppelten Speichersystemen. Auf Zellebene können Zyklen-Wirkungsgrade von über 80 % erreicht werden.

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



2 Energetischer Wirkungsgrad (EE) für den Lade-/Entladeprozess in Abhängigkeit des Ladezustands (SOC) und der normierten Leistung (P_{norm}).

1 Stationäre Strömungssimulation einer Halbzellengeometrie mit dargestelltem Druckfeld und Strömungslinien.

Redox-Flow-Batterien speichern Elektrizität chemisch gebunden in Aktivmassen flüssiger Elektrolyte, die getrennt 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.

Mittels CFD-Simulation werden grundlegende fluidtechnische Fragestellungen wie die Gestaltung der Ein- und Auslaufbereiche auf Zellebene, Fluidführung im Stack sowie geometrische Verhältnisse beantwortet. Abb. 1 zeigt anhand eines 1 kW-Zelldesigns die Strömungspfade des Elektrolyten durch eine Halbzelle sowie den Druckverlust über ein Elektrodenmaterial.

Zur Reduktion der Speicherkosten werden Zelldesigns entwickelt, die sich im Spritzgussverfahren in großen Stückzahlen herstellen lassen. Durch Materialscreening für Elektroden, Membrane und Bipolarplatten optimieren wir das elektrische Betriebsverhalten der Wandlereinheit. Zur Charakterisierung und Evaluierung steht eine Testumgebung zur Erfassung systemrelevanter Parameter zur Verfügung.

Ausgehend von diesen Messungen entwickeln wir modellbasierte Regelungsstrategien, die einen energetisch optimierten Betrieb des Redox-Flow-Batteriesystems erlauben. Die sogenannte »Smart Redox Flow Control« ermöglicht damit eine optimierte Betriebsweise durch die Minimierung energetischer Verluste der Peripheriegeräte sowie eine abgestimmte und Lebensdauer verlängernde Einbindung in das übergeordnete Energiesystem.



AMES-POWER: PORTABLES BRENNSTOFFZELLENSYSTEM

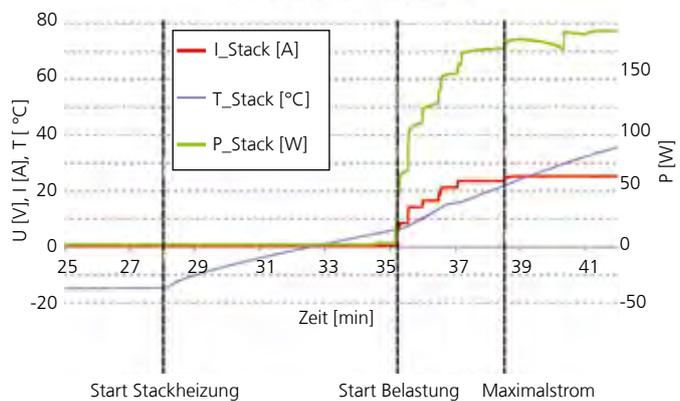
Zusammen mit unseren Projektpartnern DMT^{pe} AG, bebro electronic GmbH, Freudenberg FCCT KG, Chemetall GmbH und der TU Bergakademie Freiberg haben wir ein kaltstartfähiges Brennstoffzellensystem als Ladestation in der Notfallmedizin entwickelt. Besonderes Merkmal ist die Verwendung eines neuartigen chemischen Hydrids als Energiequelle. Gleichzeitig können über ein Kupplungssystem auch andere Wasserstoffspeicher eingesetzt werden. Das Brennstoffzellensystem wurde ausgelegt auf eine Ausgangsleistung von 100 W_{el} und den Einsatz unter Umgebungsbedingungen von -15 °C bis +50 °C. Bei dem Systemdesign stand die normgerechte und serienfähige Entwicklung im Vordergrund.

Gerrit Ammon, Kolja Bromberger, Ulf Groos, Stefan Keller, **Wolfgang Koch**, Johannes Kostka, Christian Sadeler, Christopher Hebling

In dem entwickelten Brennstoffzellensystem erfolgt die Erzeugung des Wasserstoffs umweltfreundlich durch die chemische Reaktion von Natriumborhydrid in Tablettenform und Ameisensäure. Der von der Brennstoffzelle benötigte Wasserstoff wird On-Demand im Wasserstoffgenerator produziert. Alternativ kann eine Druckgasflasche oder ein Metallhydridspeicher angeschlossen werden.

Die zentrale Steuereinheit wurde mit der bebro electronic GmbH als universelle Steuerung ausgelegt, die als Basis für alternative Systemtopologien genutzt werden kann. Um sicherheitsrelevante Aktoren und Sensoren redundant überwachen und steuern zu können, werden zwei voneinander unabhängige Prozessoren eingesetzt. Ein integrierter Hochleistungsakku dient als Leistungspuffer zwischen Brennstoffzelle und angeschlossener Last.

1 Kaltstartfähiges, portables Brennstoffzellensystem AMES.



2 Leistungsverlauf des Brennstoffzellensystems AMES während der Aufheizphase bei einer Außentemperatur von -15 °C.

Die Brennstoffzelle haben wir nach fertigungstechnisch optimierten Gesichtspunkten entwickelt. Die typischerweise teuren Bipolarplatten wurden durch ein neuartiges Folienkonzept ersetzt. Die Kühlung der Brennstoffzelle wird mittels einer Luftkühlung realisiert. Die in der Zelle entstehende Wärme wird horizontal über Kühlkörper aus der Brennstoffzelle und durch einen Ventilator aus dem Gesamtsystem ausgetragen. Mit diesem innovativen Stackkonzept erreichen wir ein außergewöhnlich homogenes Leistungsverhalten aller Zellen.

Durch das E-PAC[®] Gehäusekonzept von DMT^{pe} werden die eingesetzten Systemkomponenten lagerichtig und stoßfest fixiert. Kühlkanäle und Öffnungen können einfach in das Gehäuse integriert werden.

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



STATISTISCHE LEBENSDAUERUNTERSUCHUNG AN PEM-BRENNSTOFFZELLEN

Für die Untersuchung der Lebensdauer und der Leistungseigenschaften von Brennstoffzellen entwickelten wir einen außertauglichen Teststand, mit dem es möglich ist, Brennstoffzellenkomponenten wie Membran-Elektroden-Einheit und Gasdiffusionslagen unter realen Bedingungen, z. B. hinsichtlich des Einflusses von Luftschadstoffen, zu charakterisieren. Der Teststand analysiert gleichzeitig 30 Testzellen, um eine hohe Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Kombiniert mit einem Gasschrank kann der Teststand an beliebigen Orten aufgestellt und durch die integrierte Regelung und Sicherheitsüberwachung komplett autark betrieben werden.

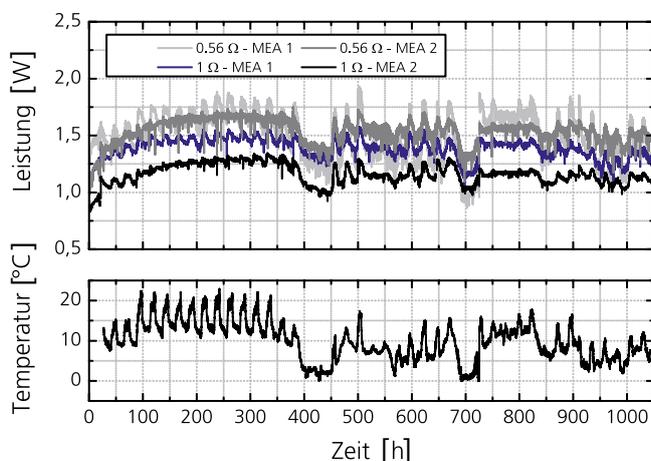
Gerrit Ammon, Anneke Georg, Dietmar Gerteisen, Peter Gesikiewicz, Ulf Groos, Timo Kurz, **Christian Sadeler**, Mario Zedda, Christopher Hebling

1 Außertauglicher Test- und Gasflaschenschrank auf dem Schauinsland bei Freiburg zur Charakterisierung von Brennstoffzellen.

Für eine statistische Untersuchung von Degradationseffekten oder anderen Einflussfaktoren, z. B. Luftverschmutzungen, ist es notwendig, eine Vielzahl von Zellen zu charakterisieren, um so mögliche Material- oder Produktionsfehler ausschließen zu können. Hierfür haben wir am Fraunhofer ISE einen Teststand entwickelt, mit dem wir bis zu 30 Testzellen gleichzeitig hinsichtlich ihres Leistungsverhaltens charakterisieren. Neben anderen Technologien können wir kostengünstige Testbrennstoffzellen in Spritzgusstechnologie einsetzen, die zusammen mit FWB Kunststofftechnik entwickelt wurden. Der Teststand ist so konzipiert, dass die Zellen bei unterschiedlichen Lastpunkten untersucht werden können. Neben der Bestimmung der Betriebsparameter wie Zellspannung und -strom werden noch ausgewählte Zelltemperaturen sowie die Umgebungstemperatur und Feuchte gemessen. Durch eine im Teststand integrierte Heizung ist es möglich, diesen auch bei Außertemperaturen unter dem Gefrierpunkt zu betreiben.

Derzeit betreiben wir in Freiburg vier Teststände mit unterschiedlicher städtischer bzw. industrieller Hintergrundbelastung sowie in einem Reinluftgebiet, mit denen wir den Einfluss der Luftverschmutzung in Abhängigkeit vom Betriebspunkt und von der verwendeten Membran-Elektroden-Einheit untersuchen. Für die Ex-Situ-Analyse steht uns ein ICP-MS (Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry) zur Verfügung, mit dem wir Verunreinigungen im Produktwasser bestimmen. Durch die parallele Analyse der eingesetzten Peripheriekomponenten kann der Ursprung der Kontamination auf die Peripherie, Materialunreinheiten oder die Luftverschmutzung zurückgeführt werden.

Die Arbeiten wurden durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.



2 Zeitlich gemittelter Leistungs- und Temperaturverlauf von vier Modulgruppen mit verschiedenen MEAs und bei unterschiedlichen Betriebspunkten.



WASSERSTOFF UND KRAFTSTOFFE AUS BIOGENEN RESTSTOFFEN

Die energetische Nutzung von Biomasse ist dann besonders klimafreundlich, wenn dafür biogene Reststoffe eingesetzt werden. Oft weisen diese einen hohen Wassergehalt auf, weshalb viele Konversionsverfahren diese Reststoffe nicht nutzen können. Mit der Flüssigphasenreformierung ist dies möglich, da ein erhöhter Prozessdruck bei gleichzeitig moderaten Temperaturen die Verdampfung des Wassers verhindert. Am Fraunhofer ISE haben wir Katalysatoren für die Flüssigphasenreformierung entwickelt und in einen kontinuierlichen Prozess integriert, der es erlaubt, aus unterschiedlichsten biogenen Substanzen je nach Prozessbedingungen Wasserstoff bzw. Alkane zu gewinnen.

Thomas Aicher, Raphael Marro, Alexander Susdorf, Achim Schaadt, Malte Schlüter, Daniela Villacreses, Christopher Hebling

Biogene Reststoffe aus der Land- und Forstwirtschaft werden bisher nicht oder nur sehr ineffizient genutzt. Ihr energetisches Potenzial wird weltweit auf etwa 50 EJ geschätzt, was ca. 12 % des weltweiten Primärenergieverbrauchs entspricht.

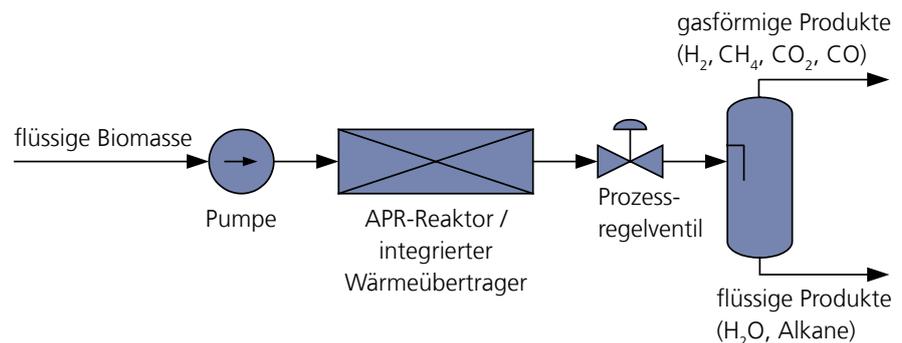
Die Flüssigphasenreformierung (Aqueous Phase Reforming, APR) könnte dazu dienen, einen großen Anteil dieser kostengünstigen Biomasse in Energieträger wie Wasserstoff

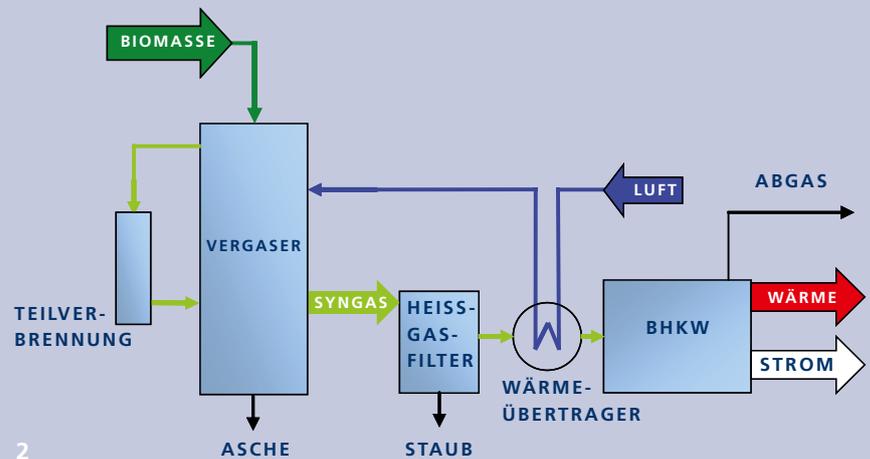
1 APR-Reaktor mit seitlich angebrachten Temperaturmessstellen, wie er in den Thermoöl-Behälter, der eine homogene Wärmezufuhr gewährleistet, eingeführt wird.

und Alkane umzuwandeln, die z. B. als Kraftstoffe eingesetzt werden könnten. Dazu muss die Biomasse entweder bereits als Flüssigkeit vorliegen oder durch eines der bekannten Vorbehandlungsverfahren (z. B. Flash-Pyrolyse) verflüssigt werden. Der APR-Prozess, der ein breites Spektrum an Ausgangsstoffen umsetzen kann, wurde von uns zunächst auf Substanzen angewandt, die sich leicht aus Biomasse herstellen lassen, z. B. Bioethanol und Glycerin.

Der verfahrenstechnische Prozess ist sehr einfach. Zunächst wird die Flüssigkeit auf einen Druck von 30–50 bar verdichtet. Da Flüssigkeiten wenig kompressibel sind, ist dazu nur ein geringer Energieaufwand erforderlich. Vor dem Eintritt in den Reaktor wird die Flüssigkeit auf ca. 250 °C erhitzt, in jedem Fall liegt die Temperatur unterhalb der Verdampfungstemperatur. Für das APR-Verfahren haben wir sowohl einen skalierfähigen Reaktor als auch einen stabilen Katalysator entwickelt. Je nachdem, welchen Katalysator wir einsetzen, erzeugen wir entweder hauptsächlich Wasserstoff oder überwiegend Alkane. Da die Produktgase bereits auf einem erhöhten Druckniveau vorliegen, reduziert sich der Energieaufwand für die sich meist anschließende Verdichtung deutlich.

2 Die Pumpe komprimiert die flüssige Biomasse im APR-Reaktor auf den notwendigen Druck, der vom Prozessregelventil reguliert wird. Anschließend können die Energieträger getrennt und für die jeweiligen Anwendungsgebiete aufbereitet werden.





BioSyn BIOMASSEVERGASER PRODUZIERT TEERFREIES SYNTHESEGAS

Mit der Realisierung eines mehrstufigen Festbett-Vergasers für 50 kW Brennstoffwärmeleistung konnten wir die technische Umsetzung eines innovativen Verfahrens zur Biomassevergasung demonstrieren. Ziel des Verfahrens ist es, aus unterschiedlicher Biomasse, z. B. Holzpellets und Biokohle, ein teerfreies Synthesegas zu produzieren, das über Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) in Strom und Wärme umgewandelt werden kann. Innovativ ist dabei die Trennung der einzelnen Reaktorstufen durch Pendelroste, die Schwelgasführung, die ohne Armaturen über eine Variation der Schütthöhen in den Stufen erfolgt, und die externe Teilverbrennung von Schwelgasen, die das autokatalytische Cracken der unerwünschten Teere ermöglicht.

Thomas Aicher, Luisa Burhenne, Christian Lintner, Lisbeth Rochlitz, Christopher Hebling

Biomassevergasung ist eine klimafreundliche Technologie zur regenerativen Erzeugung von Synthesegas. Sie bietet die Möglichkeit, in einer anschließenden Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) hocheffizient und regelbar dezentral Strom und Wärme zu produzieren. Die energetische Nutzung von Biomasse stärkt durch eine heimische Ressource die lokale Wertschöpfungskette und sichert geschlossene Stoffkreisläufe. In netzfernen Regionen stellt diese Technologie eine gute Alternative zum teuren und verlustbehafteten Netzausbau oder einem Dieselgenerator dar. Bis heute gibt es keine Anlage im Leistungsbereich < 1 MW, die unter wirtschaftlichen und technischen Gesichtspunkten erfolgreich und mit Langzeiterfahrung im KWK-Modus vollautomatisch betrieben werden konnte. Dies liegt vor allem daran, dass bei der Zersetzung von Holz viele Teere entstehen, die die Funktionstüchtigkeit von nachgeschalteten Bauteilen, insbesondere Wärmeübertrager und Motoren, beeinträchtigen.

- 1 BioSyn-Vergasungsanlage beim Aufbau am Fraunhofer ISE, noch unisoliert.
- 2 Vereinfachte Darstellung des patentierten BioSyn-Vergasungsprozesses: Als Gasreinigung wird nach dem Vergaser nur ein Heißgasfilter benötigt, bevor das Synthesegas im Blockheizkraftwerk (BHKW) zu Strom und nutzbarer Wärme umgewandelt wird.

Am Fraunhofer ISE wurde ein innovatives, für viele verschiedenartige Biomassen einsetzbares Verfahren entwickelt, die sogenannte BioSyn-Vergasung. Das patentierte Verfahren produziert ein teerfreies Synthesegas. Dies gelingt durch eine spezielle Gasführung, die ohne Armaturen über eine Variation der Schütthöhen in den Stufen erfolgt, sowie eine strikte Trennung der einzelnen Prozessschritte. Außer einem Heißgasfilter wird keine weitere Gasreinigung für den Einsatz in einem Gasmotor benötigt. Je nach Anforderung an den Heizwert des Synthesegases soll der Vergaser mit verschiedenen Rohstoffen betrieben werden können, damit er im Standort variabel ist. Das Funktionsprinzip des internen Crackens von Teeren wurde in Laborversuchen am Fraunhofer ISE nachgewiesen. Der theoretische Kaltgas-Wirkungsgrad des Verfahrens (= chemische Energie im Produktgas / chemische Energie im Brennstoff) ist größer als 80 %. Dies ist eine deutliche Steigerung gegenüber bestehenden Anlagen.

Durch einfache technische Komponenten und schon auf Langzeit-Standfestigkeit erprobte Bauteile ist der BioSyn-Vergaser wartungsarm und der Betrieb auch für kleine Leistungen (ca. 150 kW Brennstoffleistung) wirtschaftlich darstellbar. Zur Demonstration des Verfahrens wurde neben vielfältigen Laborexperimenten der mehrstufige BioSyn-Festbett-Vergaser im Technikumsmaßstab (für ca. 12 kg Biomasse pro Stunde, entspricht bei Holz 60 kW) aufgebaut, in Betrieb genommen und mit Holzpellets und Biokohle getestet und optimiert. In



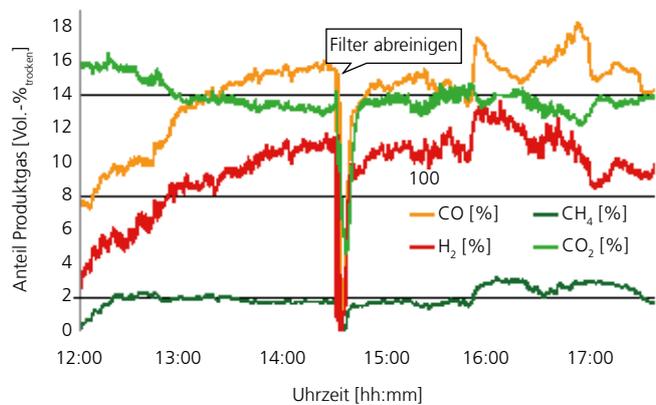
3

3 Verschiedene Biomassen als Ausgangsstoffe für die Vergasung (v. l. n. r.): Biokohle, Holzpellets, Rindenpellets.

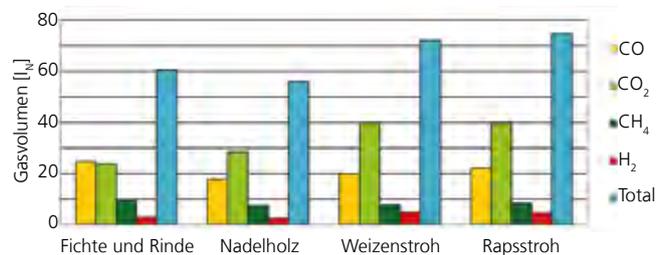
Laborexperimenten haben wir das Ausgasungsverhalten und die Produktgaszusammensetzung verschiedener Biomassen untersucht, insbesondere Holz hackschnitzel aus Buche, Fichte, Kiefer und Pappel verschiedener Wassergehalte, Pellets aus Nadelhölzern, mit und ohne Rinde, Weizenstroh, Rapsstroh und Gärresten sowie Biokohle. Wir konnten beobachten, dass ein hoher Wassergehalt und ein hoher Anteil an Cellulose zu einer schnelleren Umsetzung in Synthesegas führen als bei Hölzern mit hohem Ligninanteil. Dementsprechend sind die Reaktorverweilzeiten cellulosehaltiger bzw. grasartiger Biomasse kürzer zu wählen als die ligninhaltiger bzw. holzartiger Biomasse. Parallel zu den experimentellen Untersuchungen wurden die einzelnen Teilprozesse der thermochemischen Konversion verschiedener Biomassen mit Matlab/Simulink simuliert. Ziel ist es, den Prozess auch bei Variation der Betriebsparameter voraussagen zu können. Dies dient außerdem dazu, eine optimale Regelungsstrategie für die Automatisierung der Anlage zu ermitteln.

Durch die Optimierung der erforderlichen Peripherie (Ein- und Austrag), der Anlagensteuerung und Regelung wurden wertvolle Erkenntnisse über die Vergasung von Holzpellets und anderen festen Biomassen zu einem teerfreien Synthesegas gewonnen. Die Technikumsanlage steht am Fraunhofer ISE für weitere Untersuchungen zur Verfügung. Dies bietet deutschen Unternehmen die Möglichkeit, mit neuester Technologie eine weltweite Vorreiterstellung einzunehmen.

Das Vorhaben wird im Rahmen der Klimaschutzinitiative vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

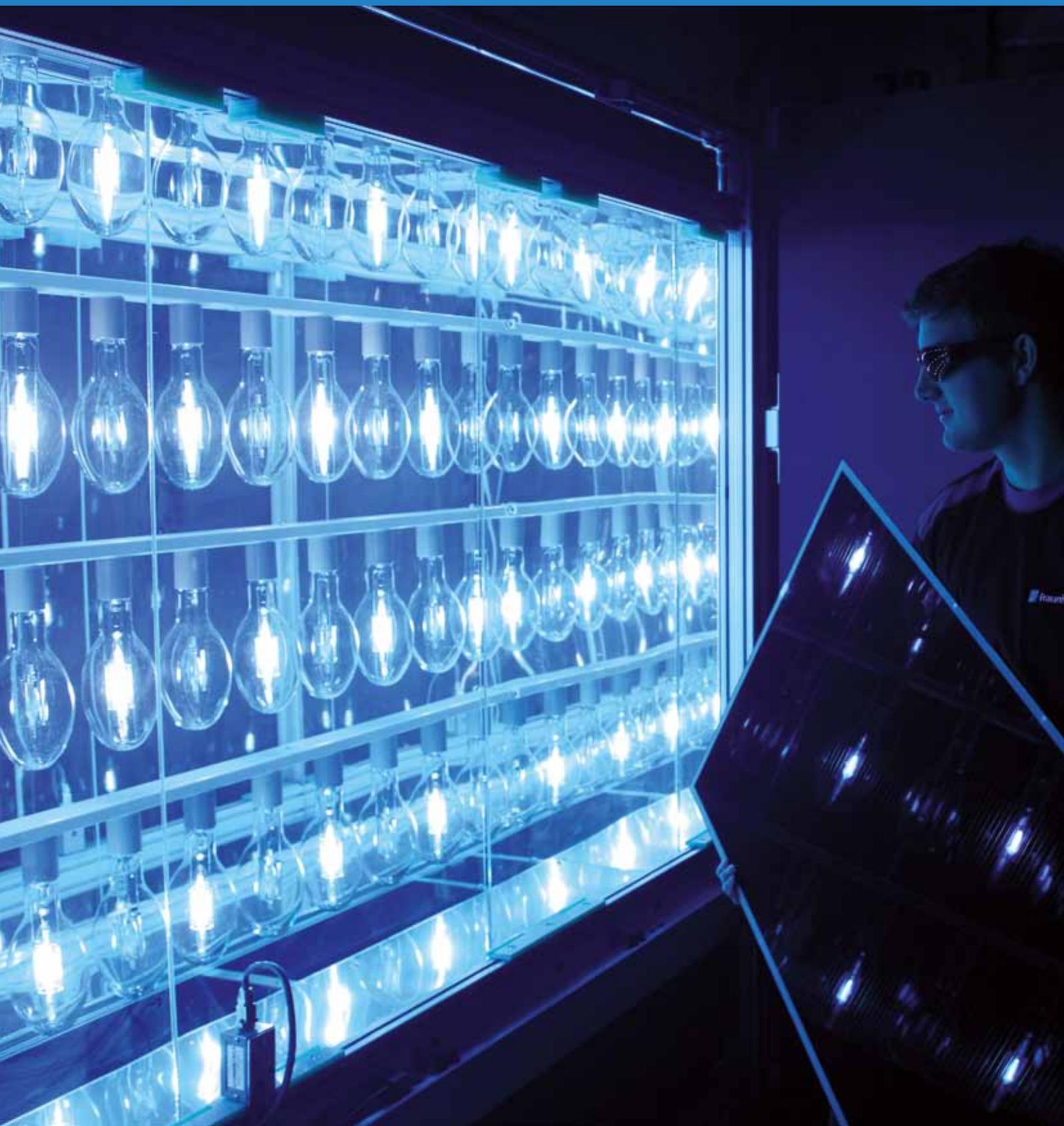


4 Trockene Produktgaszusammensetzung beim Vergasungsversuch im Technikumsreaktor mit Holzpellets bei bis zu 60 kW Brennstoffleistung. Versuchsstart war kurz vor 12:00 Uhr. Bei starker Änderung der Zusammensetzung, z. B. um 15:50, 16:20 und 17:00 Uhr, wurden Betriebsparameter variiert: die Luftmengen, die Orte der Luftzugabe und die Verweilzeiten der Biomasse in den Reaktorstufen. Optimierungsziel ist ein hoher Heizwert des Produktgases bei gleichzeitig geringem Methangehalt.



5 Produktgasmenge in Litern (CO , CO_2 , CH_4 , und H_2) aus Pyrolyseversuchen von vier verschiedenen Biomassen unter gleichen Pyrolysebedingungen. Die Ausgasung findet in einer mit 700°C heißem Stickstoff durchströmten Biomasseschüttschicht statt. Stroh entwickelt durch seinen hohen Anteil an Cellulose und Mineralien bei gleichen Bedingungen mehr Produktgase als Holz, das sich eher durch einen hohen Ligninanteil auszeichnet.

QUALITÄT SETZT SICH DURCH



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 Prüf- und Zertifizierungsverfahren an. Derzeit verfügt das Fraunhofer ISE über vier akkreditierte Testeinrichtungen: TestLab Solar Thermal Systems, TestLab Solar Façades, TestLab PV Modules und das Kalibrierlabor mit dem CalLab PV Cells und CalLab PV Modules. Zu unseren weiteren Servicebereichen zählen ein Batterie-Prüflabor, ein Wechselrichterlabor, ein Lichtlabor, eine Testeinrichtung für Wärmepumpen und Verdampfer, ein Labor für die Charakterisierung von Phasenwechselmaterialien (PCM), ein Prüflabor für Adsorptions- und poröse Materialien und ein Testzentrum für Brennstoffzellen.

Über ihre Dienstleistungen hinaus haben diese Einrichtungen auch eine Forschungsfunktion. Die bei Charakterisierung, Prüfung oder Test gewonnenen Erkenntnisse können eingebettet werden in neue Forschungsthemen – sei es in der Produktentwicklung oder -verbesserung, bei der Weiterentwicklung von Testmethoden und Standards oder bei der Theorieentwicklung, z. B. im Bereich der modellbasierten Alterungsprognose.

Das TestLab Solar Thermal Systems ist seit Mai 2005 akkreditiert. Die Testeinrichtungen sind:

- Solarluftkollektorteststand
- Hagelschlagteststand
- System- und Speicherteststand
- Außenteststand mit Trackern und dynamischem Rack
- Innenteststand mit Solarsimulator
(max. Aperturfläche 3 x 3,5 m²)
- Kollektorteststand bis 200 °C

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 (s. S. 137).

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. S. 138).

Geprüft werden im Rahmen der Akkreditierung:

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

Das TestLab PV Modules hat 2011 eine erweiterte Akkreditierung für die Bauartzulassung von PV-Modulen gemäß IEC 61215 und IEC 61646 sowie eine erstmalige Akkreditierung für die Sicherheitsnorm IEC 61730 erhalten. Dadurch konnten die Prüfabläufe weiter optimiert und die Prüfzeiten für die Bauartzulassung von PV-Modulen nochmals verkürzt werden. 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 Prüf- und Zertifizierungsinstitut übernimmt das Fraunhofer ISE alle Performance-Prüfungen, das VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut stellt nach erfolgreicher Prüfung die Zertifikate aus. Neben den Prüfungen für die Bauartzertifizierung werden entwicklungsbegleitende Prüfungen für Module und Modulkomponenten nach Anforderungen der Hersteller durchgeführt. Das TestLab PV Modules arbeitet dabei eng mit den Kalibrierlaboren am Fraunhofer ISE – CalLab PV Cells und CalLab PV Modules – zusammen (s. S. 134/135).

Das vierte Labor, mit Akkreditierung seit November 2006, ist unser Kalibrierlabor mit dem CalLab PV Cells und CalLab PV Modules, das zu den weltweit führenden seiner Art zählt. Das Kalibrieren von Solarmodulen spielt eine wichtige Rolle bei Produktvergleichen und bei der Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken. Die Zellkalibrierung im CalLab PV Cells, das seit Ende 2008 als Kalibrierlabor beim Deutschen Kalibrierdienst (DKD) akkreditiert ist, dient als Referenz für Industrie und Forschung. Die Modulkalibrierung im CalLab PV Modules ist einerseits Bestandteil der Modul-Zertifizierung und dient andererseits der Qualitätssicherung von Anlagen sowie der Unterstützung bei der Entwicklung (s. S. 135).

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. (FH) Frank Neuberger
Telefon +49 761 4588-5280
frank.neuberger@ise.fraunhofer.de

Dr. Gerald Siefer
Konzentratormodule
Telefon +49 761 4588-5433
gerald.siefer@ise.fraunhofer.de

TestLab PV Modules

Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. (Arch.)
Claudio Ferrara
Telefon +49 761 4588-5650
claudio.ferrara@ise.fraunhofer.de

Dipl.-Ing. Daniel Philipp
Telefon +49 761 4588-5414
daniel.philipp@ise.fraunhofer.de

TestLab Solar Thermal Systems

Dipl.-Ing. (FH) Korbinian Kramer
Dipl.-Ing. (FH) Stefan Mehnert
Telefon +49 761 4588-5354
testlab-sts@ise.fraunhofer.de

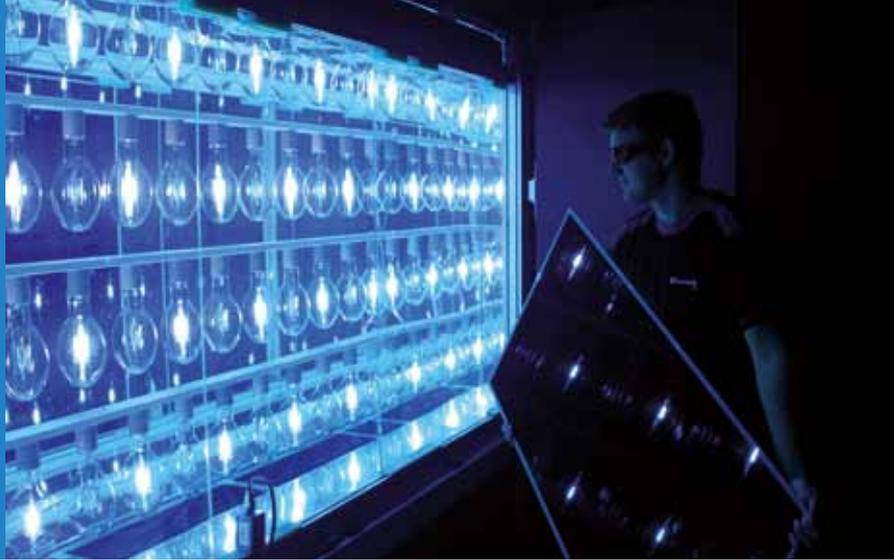
TestLab Solar Façades

Dipl.-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



Anlage zur Kalibrierung von Photovoltaikmodulen: Neueste Sonnensimulator- und Lightsoaking-Einheiten bereiten die Module optimal auf den Kalibriervorgang vor. Das Dienstleistungsangebot des Fraunhofer ISE dient der Qualitätssicherung von solartechnischen Produkten. Darüber hinaus erfüllt es 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.

Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken	Dr. Nils Reich Ertragsgutachten	Telefon +49 761 4588-5826 nils.reich@ise.fraunhofer.de
	Dipl.-Ing. Andreas Steinhüser Anlagenprüfung	Telefon + 49 761 4588-5225 andreas.steinhueser@ise.fraunhofer.de
	Dipl.-Ing. Anselm Kröger-Vodde Qualitätsmonitoring	Telefon +49 761 4588-5671 anselm.kroeger-vodde@ise.fraunhofer.de
Photovoltaik Leistungselektronik	Prof. Dr. Bruno Burger Charakterisierung von Wechselrichtern	Telefon +49 761 4588-5237 bruno.burger@ise.fraunhofer.de
Wechselrichterlabor	Dipl.-Ing. Sönke Rogalla	Telefon +49 761 4588-5454 soenke.rogalla@ise.fraunhofer.de
Batterie-Prüflabor	Dipl.-Ing. Stephan Lux	Telefon +49 761 4588-5419 stephan.lux@ise.fraunhofer.de
Lichtlabor	Dipl.-Ing. (FH) Norbert Pfanner	Telefon +49 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
PCM-Labor	Dipl.-Ing. (FH) Thomas Haussmann	Telefon +49 761 4588-5351 thomas.haussmann@ise.fraunhofer.de
Prüflabor für Adsorptionsmaterialien und poröse Materialien	Dr. Stefan Henninger	Telefon +49 761 4588-5104 stefan.henninger@ise.fraunhofer.de
Testzentrum Brennstoffzelle	Dipl.-Ing. Ulf Groos	Telefon +49 761 4588-5202 ulf.groos@ise.fraunhofer.de



KALIBRIEREN VON SOLARZELLEN NACH INTERNATIONALEN STANDARDS

Das Callab 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 Callab PV Cells zählt zu den weltweit führenden PV-Kalibrierlabors. Das Kalibrierlabor ist Referenz für Forschung und Industrie, Solarzellenhersteller lassen ihre Referenzsolarzellen für die Produktion nach internationalen Standards bei uns kalibrieren.

Tobias Gandy, Jochen Hohl-Ebinger, Thomas Hultzsch, Robert Köhn, Katinka Kordelos, Markus Mundus, Simone Petermann, Michael Schachtner, Wendy Schneider, Holger Seifert, Astrid Semeraro, Karin Siebert, **Gerald Siefer, Wilhelm Warta**, Jan Weiß, Jutta Zielonka

Das Callab 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. Ein neues Verfahren, das es uns erlaubt, die Temperaturkoeffizienten mit bisher unerreichter Präzision zu bestimmen, wird inzwischen von Solarzellenherstellern stark nachgefragt. Das Besondere bei unserem Verfahren ist die Messung der temperaturabhängigen spektralen Empfindlichkeit.

Nach dem Umzug in neue Laborräume konnten wir unsere Messmöglichkeiten unter dem Aspekt der Umgebungsbedingungen weiter optimieren und durch eine verbesserte

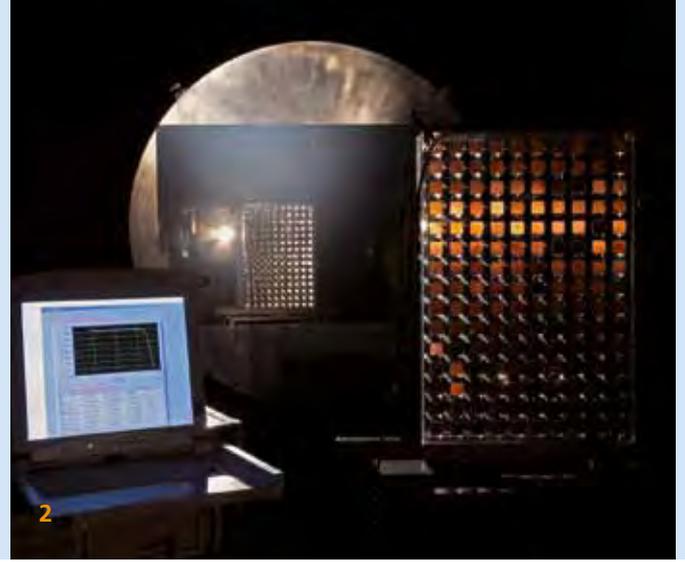
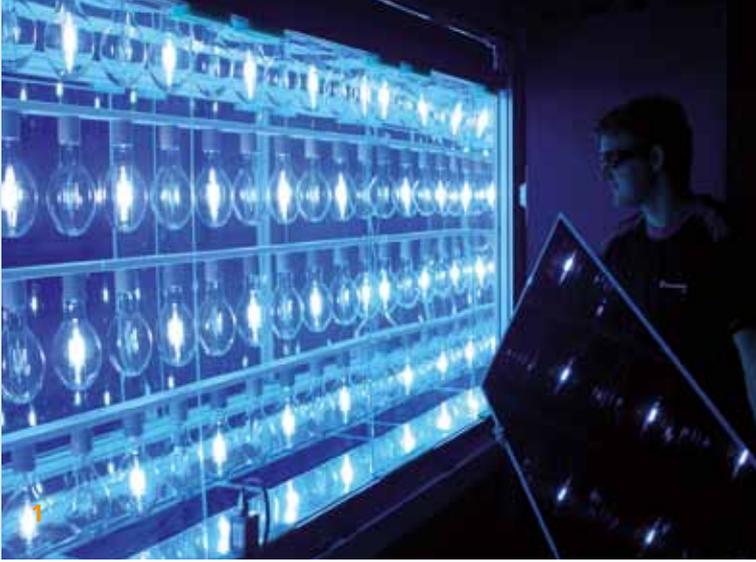
1 *Spektrale Empfindlichkeiten werden auch an großflächigen Solarzellen mit hoher Genauigkeit und mit exakter Angabe der Messunsicherheiten bestimmt.*

Infrastruktur jetzt eine noch bessere Versorgung der Industrie mit Referenzen sicherstellen.

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 Erweiterung unserer Kalibriermöglichkeiten von Mehrfachzellen aus Dünnschichtmaterialien konnten wir die rasante Entwicklung dieser Technologie noch besser durch präzise Messungen unterstützen.

Kalibrierung von Mehrfachsolarzellen

- Die spektrale Empfindlichkeit bzw. externe Quanteneffizienz von Mehrfachsolarzellen wird an unserem Gittermonochromatormessplatz gemessen, 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 haben wir einen Sonnensimulator mit sechs unabhängigen Lichtquellen zur kalibrierten Vermessung von Solarzellen mit bis zu sechs pn-Übergängen in Betrieb genommen.



KALIBRIEREN VON PV- UND KONZENTRATORMODULEN

Das Callab PV Modules 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, Martin Kaiser, Jürgen Ketterer, Klaus Kiefer, Ulli Kräling, Carlos Moschella, **Frank Neuberger**, Michael Schachtner, **Gerald Siefer**, Mark Tröscher

Die präzise Kalibrierung von PV-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 der Simulatorkomponenten 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. Des Weiteren können Elektrolumineszenzaufnahmen von PV-Modulen angefertigt werden. Für das Auge unsichtbare Defekte, z. B. Mikrorisse oder Kontaktfingerfehler, können damit festgestellt werden.

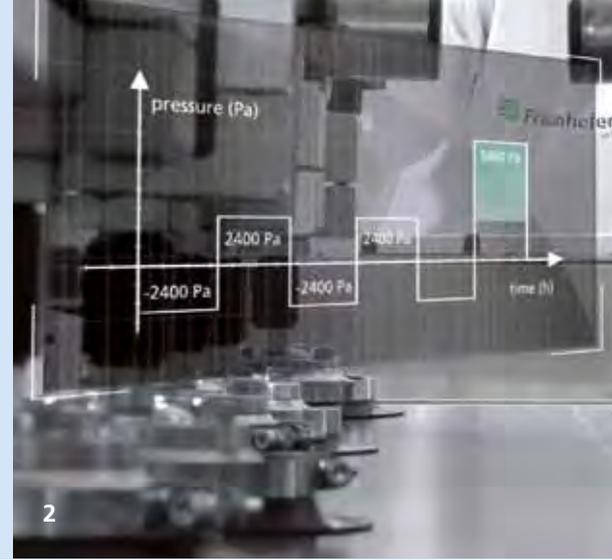
Unsere langjährige Erfahrung im Bereich der Modulkalibrierung in Kombination mit neuestem Messequipment und effektiven Arbeitsprozessen ermöglichen uns die zeitnahe Durchführung komplexer kundenspezifischer Aufgabenstellungen.

- 1 *Neueste Sonnensimulator- und Lightsoaking-Einheiten bereiten die PV-Module optimal auf die Kalibrierung vor.*
- 2 *Labormessplatz zur Vermessung von Konzentratormodulen mit Parabolspiegel zur Parallelisierung des Lichts.*

Vermessen von Konzentratormodulen

Die Vermessung von Konzentratormodulen erfolgt gewöhnlich unter Freilandbedingungen. Hierzu stehen uns mehrere Nachführeinheiten mit Messdatenerfassung zur Verfügung, die neben der Strom-Spannungskennlinie auch alle relevanten Einstrahlungs- und Wetterdaten aufnehmen. Außerdem 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.

www.callab.de



TESTLAB PV MODULES ERWEITERT PRÜFKAPAZITÄTEN WELTWEIT

2011 hat das TestLab PV Modules eine erweiterte Neuakkreditierung für die Bauartzulassung von PV-Modulen gemäß IEC 61215 und IEC 61646 sowie eine erstmalige Akkreditierung für die Sicherheitsnorm IEC 61730 erhalten. Dadurch konnten die Prüfabläufe weiter optimiert und die Prüfzeiten für die Bauartzulassung von PV-Modulen nochmals verkürzt werden. Die Fraunhofer-Präsenz und die Marktanbindung in den USA wurde durch ein neues Testlabor für PV-Module (CFV Solar) in New Mexico im Rahmen eines Joint-Ventures verstärkt.

Stefan Ali, Holger Ambrosi, Heinrich Berg, Ilie Cretu, Jürgen Disch, **Claudio Ferrara**, Stephan Hoffmann, Philipp Hog, Michael Köhl, Kerstin Körner-Ruf, Amelie Köpple, Georg Mülhöfer, Daniel Philipp, Carola Völker, Jeannette Wolf

Mit unserem Partner, dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut, betreiben wir am Standort Freiburg das TestLab PV Modules. Nach erfolgreichem Abschluss der Modul-Prüfungen stellt der VDE das Bauart-Zertifikat aus. Jenseits der Zertifizierungsanforderungen entwickeln wir mit Materialherstellern, Modulherstellern und Finanzinstituten maßgeschneiderte Prüfsequenzen zur Qualifizierung von PV-Produkten. Leistungsfähige Prüfeinrichtungen in Verbindung mit unserer langjährigen Erfahrung in Praxis und Forschung garantieren eine hohe Qualität der Ergebnisse. Neue, teilweise am Fraunhofer ISE entwickelte Prüfeinrichtungen ermöglichen kürzere Prüfzeiten für die Zertifizierung sowie die Durchführung von Prüfungen nach Kundenvorgaben für FuE-Projekte und als entwicklungsbegleitende Unterstützung.

Im Rahmen der Neuakkreditierung wurde der Akkreditierungsbereich des TestLab PV Modules um den Sicherheitsstandard für PV-Module IEC 61730 erweitert. Dieser Schritt erlaubt die weitere Optimierung bei den Prüfabläufen und der räumlichen Zusammenlegung von Prüfeinrichtungen. Neben der

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

Vergrößerung der Prüf- und Testkapazitäten und den damit verbundenen kürzeren Prüfzeiten wurden auch neue und verbesserte Prüfeinrichtungen entwickelt. Diese dienen der Untersuchung der Einflüsse von kombinierten Lasten, 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 (Abb. 1).

Zur Stärkung unserer globalen Präsenz und zur Diversifizierung unserer hochwertigen Prüfdienstleistungen haben wir ein weiteres Testlabor für PV-Module in Albuquerque, New Mexico (USA), aufgebaut und in Betrieb genommen. Das Joint Venture mit der Canadian Standards Association (CSA), dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut und mit dem Fraunhofer CSE in Boston schafft hervorragende Bedingungen, um die Zusammenarbeit im Bereich der weltweiten Modultests zu intensivieren. Durch seine hohe ganzjährige Direktstrahlung bietet der Standort Albuquerque außerdem beste Voraussetzungen für das Testen und Entwickeln von PV-Modulen auf der Basis von Konzentratortechnologien.

Mit dem VDE-Institut betreiben wir in Singapur ein Unternehmen, das Prüf- und Zertifizierungsdienstleistungen für PV-Module anbietet. »VDE-ISE Pte. Ltd.« unterstützt den Ausbau der Solartechnologie im asiatischen Raum in Kooperation mit dem Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS).



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, **Korbinian Kramer**, Stefan Mehnert, Simon Notz, Rahel Ott, Jens Richter, Arim Schäfer, Christian Schmidt, Christoph Thoma

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.

2011 wurde maßgeblich an der Revision der einschlägigen Normenreihen gearbeitet. Hierzu konnten die empirische Validierung und die Methodenentwicklung vorangetrieben werden, u. a. für die Kombination von Solarthermie und Wärmepumpen, konzentrierende Kollektoren und PCM-Speicher. Ein ebenfalls wichtiges Thema war das Testen von Wärmerohren (Heat Pipe). Hier wurde der Teststand zur Überprüfung des Ansprechverhaltens sowie der übertragenen Leistung fertig gestellt.

Weitergeführt wurden auch vergleichende Untersuchungen zu PV-solarthermischen Hybridkollektoren (PVT). Damit steht für viele Varianten dieser Technologie eine Methodik zur Charakterisierung im TestLab Solar Thermal Systems zur Verfügung.

Abgeschlossen wurden die intensiven und langjährigen Arbeiten an unserem Solarluftkollektorteststand. Eine tech-

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

nische Charakterisierung ähnlich wie für flüssigkeitsführende Kollektoren ist nun möglich. Hier wurde mit der Erweiterung der Testmöglichkeiten für ungedeckte Luftkollektoren begonnen.

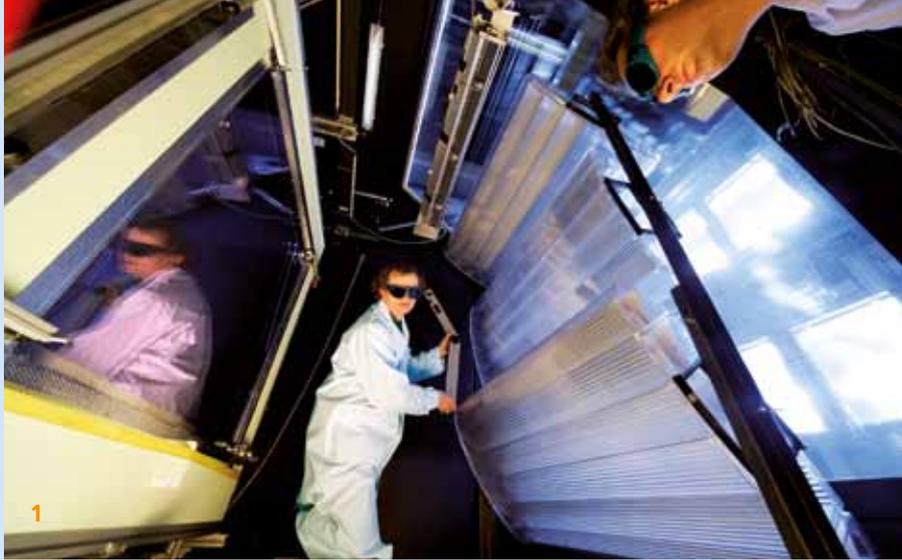
Systemuntersuchungen nach DIN EN 12976-1,2:2006 können weiterhin an bis zu vier vollständig aufgebauten Warmwasseranlagen parallel durchgeführt werden. Das Labor bietet zusätzlich die Möglichkeiten, Speichervermessung nach DIN EN 12977-3:2008 (u. a.) durchzuführen.

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 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 Prozesswärme Kollektoren (z. B. für solarthermisch angetriebene Klimatisierung) möglich.

2011 konnten auch in der Normungsarbeit, die von unseren Mitarbeitern geleistet wird, viele methodische Weiterentwicklungen umgesetzt werden, die sich in den neuen Normen wiederfinden werden. So wird das TestLab Solar Thermal Systems seinem Anspruch gerecht, nicht nur zu prüfen, sondern auch Maßstäbe zu setzen und mit zu gestalten.

www.kollektortest.de



VERMESSUNG VON FASSADEN UND TRANSPARENTEN BAUTEILEN

Entwicklern, Herstellern und Planern von Fassaden, -komponenten und solaren Komponenten bieten wir im TestLab Solar Façades ein umfassendes Dienstleistungsangebot zur Charakterisierung von innovativen Bauteilen oder Materialien an. Für transparente Bauteile und Sonnenschutzsysteme stehen Speziallabors zur Bestimmung der optischen und thermischen Eigenschaften zur Verfügung. Bei Fassaden zur aktiven 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, Jan Wienold, Helen Rose Wilson

Wir charakterisieren transparente und transluzente Materialien, prüfen Bauteile, z. B. Verglasungen und bewerten die energetischen, thermischen und optischen Eigenschaften von kompletten Fassaden.

Folgende Prüfstände stehen zur Verfügung:

- Solarkalorimeter zur Bestimmung des 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 Gesamtenergie-durchlassgrads (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 (Gesamtenergie-durchlassgrad) 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

Mit den vier Phasen des Fraunhofer ISE Qualitätszirkels – Ertragsgutachten, Modulcharakterisierung, Anlagenprüfung und Monitoring – stellen wir eine umfassende Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken sicher:

- Bereits in der Planungsphase einer PV-Anlage setzen unsere qualitätssichernden Leistungen an. Mit unseren Gutachten lassen sich die zu erwartenden Erträge zuverlässig prognostizieren.
- Hat eine PV-Anlage den Betrieb aufgenommen, so gibt eine umfangreiche Vor-Ort-Analyse mit visueller Überprüfung, thermographischen Aufnahmen und tatsächlicher Leistungsermittlung Aufschluss über die Qualität der Anlage.
- Über die komplette Betriebsdauer einer PV-Anlage hinweg bietet unser kundenspezifisches PV-Monitoring eine präzise Analyse der Effizienz von Systemen und Komponenten.

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



Batterie-Prüflabor

Batterietechnologien

Wir prüfen Batterien und Systeme auf der Basis von z. B. Blei, NiCd, NiMH, Li-Ionen-Zellen sowie Hochtemperaturbatterien und Doppelschichtkondensatoren. Es sind Batterietestsysteme und Impedanzspektrometer vorhanden, mit denen nach einschlägigen Vorschriften (DIN, IEC, PVGAP u. a.) oder kundenspezifisch in der Klimakammer oder im Wasserbad getestet wird.

Langzeittests

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

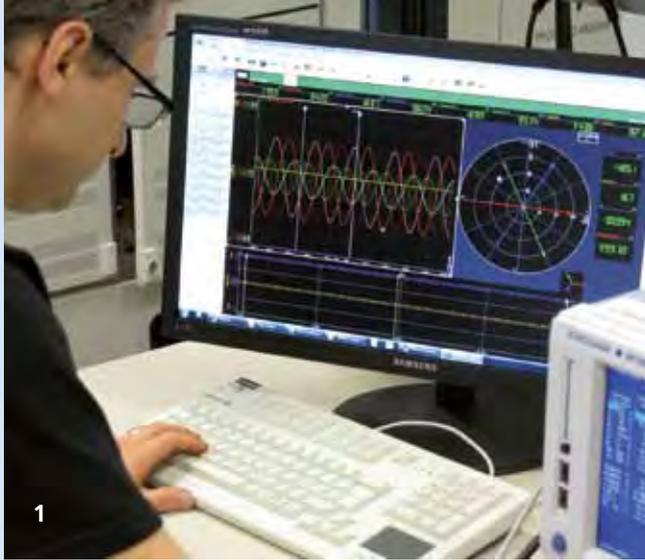
Automotive-Bereich

Wir testen Systeme bis zu 250 kW bei Strömen bis zu 600 A und Spannungen bis zu 1000 V. Eine CAN-Bus-Ansteuerung und die Beaufschlagung mit Fahrzyklen ist möglich. Wir prüfen aus Sicherheitsgründen in einer inertisierten Klimakammer mit Löschesystem.

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

1 10 MWp Solarkraftwerk in Masdar, Abu Dhabi.

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



1

Wechselrichterlabor

Das Megawattlabor am Fraunhofer ISE bietet alle notwendigen Einrichtungen für die Prüfung von Wechselrichtern bis zu einer Leistung von 1 MW nach nationalen und internationalen Netzspeiserichtlinien. Eine mittelspannungsseitige »Low Voltage Ride Through«-Prüfeinrichtung erlaubt es uns, das Verhalten von Wechselrichtern auf kurzzeitige Netzfehler zu untersuchen. Diese Prüfungen sind u. a. durch die deutsche BDEW-Richtlinie gefordert.

Unser erfahrenes Team steht Kunden bei den Aktivitäten in unserem Labor kompetent zur Seite. Ein Solargeneratorsimulator mit einer Leistung von bis zu 1,3 MW und unsere hochpräzise Messtechnik ermöglichen nicht nur die Bestimmung des Umwandlungswirkungsgrads von Wechselrichtern, sondern auch deren Anpassungswirkungsgrad (MPP-Tracking-Verhalten).

Bruno Burger, **Sönke Rogalla**

1 Unsere Ausstattung und unser erfahrenes Team ermöglichen eine detaillierte Analyse von Modul-, String- und Zentralwechselrichtern bis zu einer Leistung von 1 MW hinsichtlich Performance und Verhalten am Netz.



2

Lichtlabor

Charakterisierung

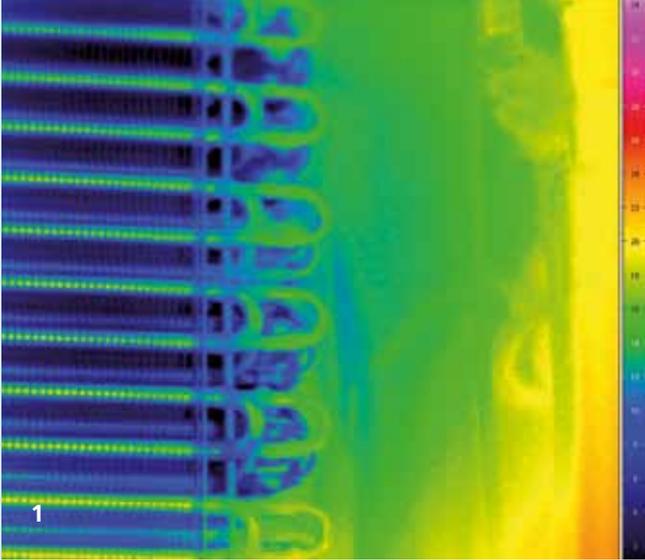
Wir führen präzise Messungen lichttechnischer Größen an LED und Leuchtstofflampen, Leuchten, Beleuchtungssystemen und Lichtquellen durch, z. B. die Messung des Lichtstroms, der Lichtausbeute und der Beleuchtungsstärkeverteilung, sowie das lichttechnische Betriebs- und Langzeitverhalten unter verschiedenen Umgebungsbedingungen. Wir erfassen ebenfalls die elektrischen Eigenschaften von Betriebselektronik und Vorschaltgeräten wie Wirkungsgrad, Betriebsführungsverhalten und Fehlerverhalten.

Apparative Ausstattung

- softwaregesteuerter Lichtmesstand mit einem Kugelphotometer mit 1,50 m Durchmesser und Spektrometer
- Leuchtdichtekamera, Luxmeter und Langzeitteststände
- breitbandige, präzise Wattmeter, Digitaloszilloskope
- programmierbare, langzeitstabile Stromversorgungen

Georg Bopp, **Norbert Pfanner**

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



Teststand für Wärmepumpen und Verdampfer

In den letzten zwei Jahren wurden am Fraunhofer ISE Teststandkapazitäten für Wärmepumpen und Verdampfer kleiner Leistung aufgebaut. Aktuell wurde ein Teststand für luftbeaufschlagte Verdampfer mit mehreren Wärmequellen erweitert.

Wir betreiben einen Teststand zur Vermessung von Wärmepumpen. Der Wärmepumpenteststand deckt dabei Heizleistungen von 4 kW bis zu 12 kW ab. Quellen können dabei Sole, Wasser oder Luft – einzeln oder auch in Kombination miteinander – und Senken Luft oder Wasser sein.

Die Messungen erfolgen meist parallel zur Komponentenentwicklung normgerecht gemäß EN 14511, EN 14825 und bei Bedarf noch nach EN 255-3 bzw. nach EN 16147. Jedoch erfolgen diese Messungen ohne Erstellung offizieller Prüfzertifikate.

Marek Miara, **Thore Oltersdorf**, Jeannette Wapler

PCM-Labor: Charakterisierung von Latentwärmespeichermaterialien

Im PCM-Labor werden Latentwärmespeichermaterialien, -Verbünde, -Objekte und -Systeme gemäß den Prüfkriterien für Enthalpie-Temperatur-Verlauf und Reproduzierbarkeit des Phasenübergangs nach RAL GZ 869 vermessen. Das Labor ist zugelassene Zertifizierungsstelle für dieses Gütezeichen.

Außerdem stehen Messgeräte für folgende Materialparameter zur Verfügung:

- Wärmeleitfähigkeit und k-Wert für Baustoffe und Wandaufbauten
- spezifische und latente Wärmespeicherkapazität, Nukleationstemperatur und Unterkühlung mittels Calvet- und Heatflux-DSC
- Zyklierungsapparaturen
- Nach DIN EN 14240 aufgebauter Testraum zur statischen und dynamischen Vermessung von Flächenheiz- und -kühlsystemen, auch solchen, die PCM enthalten
- Testräume mit Außenbezug zur Vermessung von PCM-Systemen
- speziell für Phasenwechselfluide PCS:
 - Dichte
 - Wärmeleitfähigkeit
 - Partikelgröße
 - Viskosität
 - Stabilitätsanalyse
- Teststände zur Herstellung, Charakterisierung und Zyklierung von Emulsionen

Stefan Gschwander, **Thomas Haussmann**, Peter Schossig

1 Thermographieaufnahme eines 3-Fluid-Verdampfers mit Glykol-Wasser durchströmten Innenrohren entlang der Rohrachse und den Krümmern sowie verdampfungsunterkühlte, luftumströmte Außenrohre und Lamellen.

2 Die Vermessung von Flächenheiz- und -kühlsystemen unter dynamischen und statischen Lastprofilen erfolgt in einem 4 m x 4 m x 3 m großen adiabaten Testraum, aufgebaut am Fraunhofer ISE nach DIN EN 14240.



Prüflabor für Adsorptionsmaterialien und poröse Materialien

Die Labors für Thermo- und Strukturanalytik bieten ein breites Spektrum an Analysemöglichkeiten für poröse Materialien und Werkstoffe.

Unsere Möglichkeiten umfassen hierbei Gassorptionsmessungen mit verschiedenen Prüfgasen (N_2 , CO_2 , EtOH, MeOH, H_2O) zur Bestimmung der Oberfläche, der Poren- und Adsorptionscharakteristik mit volumetrischen Methoden. Zusätzlich stehen für die Messgase H_2O , EtOH und MeOH auch thermogravimetrische Methoden zur Verfügung. Geräte zur Quecksilberintrusion und Helium-Pyknometrie runden das Profil ab. Im Hinblick auf Wärmekapazität und -leitfähigkeit stehen verschiedene Kalorimeter sowie eine Laser-Flash Anlage zur Verfügung. Die morphologischen Untersuchungsmethoden umfassen Licht- und Laser-Scanning-Mikroskopie sowie Röntgenpulverdiffraktometrie.

Stefan Henninger, Peter Schossig

1 Thermowaage zur Bestimmung der Wasserdampfaufnahmekapazität großer Verbundproben in Abhängigkeit von Druck und Temperatur.



Testzentrum Brennstoffzelle

Wir charakterisieren, testen und prüfen Membran-Brennstoffzellen und -Systeme mit elektrischen Leistungen bis 5 kW_{el} sowie Mikrobrennstoffzellen. In Kooperation mit dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut bieten wir Beratung, normgerechte Prüfungen und eine Zertifizierung an.

Bei der Charakterisierung von Brennstoffzellen legen wir Wert auf eine detaillierte Untersuchung lokaler Vorgänge. Mit Hilfe der elektrochemischen Impedanzspektroskopie können wir die einzelnen chemisch-physikalischen Prozesse hinsichtlich ihrer Abhängigkeit von Materialeigenschaften, Konstruktion und Betriebsführung analysieren.

Unsere begehbare Klimakammer ermöglicht Untersuchungen in einem Temperaturbereich von -20 °C bis $+60\text{ °C}$. Die relative Feuchte kann dabei ab $+5\text{ °C}$ zwischen 10 % und 95 % variiert werden. Hervorzuheben ist der hohe Durchsatz klimatisierter Luft bis zu 2000 m^3 pro Stunde.

Dietmar Gerteisen, **Ulf Groos**, Jürgen Wolf,

2 Klimakammer zur Charakterisierung von Brennstoffzellenstapeln und -systemen mit Leistungen bis 5 kW_{el} .

ANHANG

144	Gastwissenschaftler
145	Kongresse, Tagungen und Seminare
146	Promotionen
147	Nachwuchsförderung
148	Erteilte Patente
149	Vorlesungen und Seminare
150	Bücher
151	Reviewed Journals
160	Vorträge

GASTWISSENSCHAFTLER

Luis Barrera Aguilar

Universidad Popular Autonoma del Estado de Puebla, Puebla, Mexiko, 1.9.–30.12.2011

Arbeitsgebiet: Untersuchungen von PV Hybrid-System und Nutzung von Simulationstools

Matteo Balestrieri

Università di Bologna, Bologna, Italien

16.10.2009–28.2.2011

Arbeitsgebiet: Analyse von Silicium-Oberflächen mit SPV

Erika Biserni

Politecnico di Milano, Mailand, Italien, 1.6.2010–30.9.2011

Arbeitsgebiet: Laser Chemical Processing (LCP)

Dr. Alfa Oumar Dissa

Université de Ouagadougou, Ouagadougou, Burkina Faso

19.9.–18.10.2011

Arbeitsgebiet: Thermische Solarenergie

Karoline Fath

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe,

1.11.2010–31.10.2013

Arbeitsgebiet: Lebenszyklusanalyse von gebäude-integrierten PV-Anlagen

Simon Fey

Hochschule Offenburg, Offenburg, 1.9.2011–31.7.2014

Arbeitsgebiet: Energie Gateway

M. Sc. J. Ignacio Torrens Galdiz

National University of Ireland Galway, Galway, Irland, 1.2.–31.7.2011

Arbeitsgebiet: Betriebsführung von Gebäuden

Mónica Delgado Gracia

Universidad de Zaragoza, Zaragoza, Spanien, 1.9.–30.11.2011

Arbeitsgebiet: Latentwärmespeicher

Antanas Katalevskis

Kaunas University of Technology, Kaunas, Litauen, 1.2.2011–31.1.2012

Arbeitsgebiet: Fe-Imaging mit Photolumineszenz

Alexander V. Mellor

Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spanien, 1.6.–30.11.2011

Arbeitsgebiet: Photonische Strukturen für Solarzellen

Amada Montesdeoca-Santana

Universidad de La Laguna, Teneriffa, Spanien, 1.9.2008–31.7.2011

Arbeitsgebiet: Silicium-Solarzellen

Amir Nashed

Alexandria, Ägypten, 1.9.–31.12.2011

Arbeitsgebiet: Solare Meerwasserentsalzung

Prof. Uwe Nuss

Hochschule Offenburg, Offenburg, Deutschland, 1.10.2010–31.1.2011

Arbeitsgebiet: Regelung von PV-Wechselrichtern

Francesco Passerini

Università degli Studi di Trento, Trient, Italien, 16.7.2010–15.4.2011

Arbeitsgebiet: Energieeffiziente Gebäude

Pheng Phang

Australian National University, Canberra, Australien, 1.2.–28.5.2011

Arbeitsgebiet: Mikro-Photolumineszenzspektroskopie und Simulation

Seok-Jun Seo

Gwangju Institute of Science and Technology (GIFT), Gwangju, Südkorea, 1.3.2011–28.2.2012

Arbeitsgebiet: Elektrochemische Eigenschaften von porösen Substraten für Farbstoffsolarzellen

Dr. Nada Zamel

University of Waterloo, Waterloo, Kanada, 1.10.2011–30.9.2013

Arbeitsgebiet: Wassermanagement und Brennstoffzellen

KONGRESSE, TAGUNGEN UND SEMINARE

Workshop SiliconFOREST , Falkau, 27.2.–2.3.2011

*26. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI),
Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2.–4.3.2011*

*Workshop »Batteriesystemtechnik«, Fraunhofer-Forum Berlin,
Berlin, 15.3.2011*

*CPV-7, 7th International Conference on Concentrating Photovoltaic
Systems, Las Vegas, NV, USA, 4.–6.4.2011*

Workshop »PV-Module Reliability«, Berlin, 5./6.4.2011

*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*

Berliner Energie-Tage, Berlin, 20.5.2011

*15th Am0-Workshop on Space Solar Cell Calibration and
Measurement Techniques, Freiburg, 31.5.–3.6. 2011*

Fachforum »Quality of PV-Systems« (OTTI), München, 6.6.2011

Intersolar Europe Conference, München, 6.–10.6.2011

7th Advanced PV Manufacturing Forum, München, 7.6.2011

*37th IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Seattle, WA, USA,
19.–24.6.2011*

8th Credit Suisse Salon, Zürich, Schweiz, 5.7.2011

*6th Seminar Power Electronics for Photovoltaics (OTTI),
München-Dornach, 6./7.7.2011*

*1st Seminar Power Electronics for Photovoltaics, San Francisco, CA,
USA, 11.7.2011*

*Intersolar North America Conference, San Francisco, CA, USA,
11.–14.7.2011*

ISES Solar World Congress, Kassel, 28.8.–2.9.2011

*26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition,
Hamburg, 5.–9.9.2011*

*Workshop »ModQS – Automatisierte Fehlerdiagnose in
Heizungssystemen«, Hamburg-Harburg, 14.9.2011*

*Workshop »Ladesysteme für Elektrofahrzeuge – Konzepte und
Anforderungen«, Fraunhofer-Forum Berlin, Berlin, 27.9.2011*

*4. VDI-Fachtagung »Solarthermie – Heizen und Kühlen mit der
Sonne«, Ludwigsburg, 27./28.9.2011*

*Fachforum »Netzferne Stromversorgung mit Photovoltaik« (OTTI),
Freiburg, 4./5.10.2011*

FVEE-Jahrestagung , Berlin, 12./13.10.2011

*4th Conference Solar Air-Conditioning (OTTI), Larnaca, Zypern,
12.–14.10.2011*

Solar Summit Freiburg , Freiburg, 14./15.10.2011

*2nd European Conference SmartGrids and E-Mobility (OTTI),
München, 17./18.10.11*

*5th European Solar Thermal Energy Conference, Marseille,
Frankreich, 20./21.10.2011*

*6th International Renewable Energy Storage Conference
and Exhibition, Berlin, 28.–30.11.2011*

*Die genannten Kongresse, Tagungen und Seminare hat
das Fraunhofer ISE 2011 (mit-)organisiert.*

PROMOTIONEN

Jonas Bartsch:

»Advanced Front Side Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells with Electrochemical Techniques«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 2011

Patrick Dupeyrat:

»Experimental Development and Simulation Investigation of a Photovoltaic-Thermal Hybrid Solar Collector«, L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon, Frankreich, 2011

Jara Fernández:

»Development of Crystalline Germanium for Thermophotovoltaics and High-Efficiency Multi-Junction Solar Cells«, Universität Konstanz, Konstanz, 2010

Paul Gundel:

»Neue mikroskopische Opto-Spektroskopie-Messmethoden für die Photovoltaik«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 2011

Holger Habenicht:

»Charakterisierung leistungsmindernder Defekte und deren Umverteilung während der Herstellung von multikristallinen Silizium-Solarzellen«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 2011

Jochen Hohl-Ebinger:

»Untersuchungen zur hochpräzisen Vermessung der elektrischen Parameter von Solarzellen«, Universität Konstanz, Konstanz, 2011

Sybille Hopman:

»Anwendung des Laser Chemical Processing zur Herstellung von Silizium-Solarzellen«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2011

Michael Köhl:

»Grundlegende Untersuchungen zur Gebrauchsdaueranalyse von Photovoltaik-Modulen«, FernUniversität Hagen, Hagen, 2011

Joachim Koschikowski:

»Entwicklung von energieautark arbeitenden Wasserentsalzungsanlagen auf Basis der Membrandestillation«, Universität Kassel, Kassel, 2011

Matthias Künle:

»Silicon Carbide Single and Multilayer Thin Films for Photovoltaic Applications«, Universität Tübingen, Tübingen, 2011

Timo Kurz:

»Entwicklung eines Hochtemperatur-PEM-Brennstoffzellen-Systems auf Basis von PBI-Membranen zur effizienten Verstromung biogener Reformatgase«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 2011

Gerhard Peharz:

»Hocheffiziente photovoltaische Konzentratormodule: Untersuchung von Einflußfaktoren und Energieertragsmodellierung«, Universität Konstanz, Konstanz, 2011

Damian Pysch:

»Assembly and Analysis of Alternative Emitter Systems for Silicon Solar Cells«, Universität Konstanz, Konstanz, 2011

Christian Reichel:

»Decoupling Charge Carrier Collection and Metallization Geometry of Back-Contacted Back-Junction Silicon Solar Cells«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 2011

Jonas Schön:

»Modellierung von Prozessschritten zur Umlagerung rekombinationsaktiver Defekte in kristallinem Silizium«, Universität Konstanz, Konstanz, 2011

Dominik Suwito:

»Intrinsic and Doped Amorphous Silicon Carbide Films for the Surface Passivation of Silicon Solar Cells«, Universität Konstanz, Konstanz, 2011

Joachim Went:

»Untersuchung zur Verbesserung der Mikro-Ultrafiltration durch Ultraschall«, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, 2011

Bernhard Wille-Haussmann:

»Einsatz der symbolischen Modellreduktion zur Untersuchung der Betriebsführung im »Smart Grid«, FernUniversität Hagen, Hagen, 2011

Martin Zimmer:

»Nasschemische Prozesse bei der Herstellung von kristallinen Siliciumsolarzellen und deren Analytik«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, 2011

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.

Girl's Day 2011

Auch 2011 lud das Fraunhofer ISE wieder zum bundesweiten Girl's Day ein. 20 Schülerinnen boten wir die Möglichkeit, vor Ort mehr über die Forschungs- und Entwicklungsarbeit des Instituts zu erfahren. In verschiedenen Labors konnten die Schülerinnen unter wissenschaftlicher Anleitung experimentieren und z. B. eine Physikerin in ihrem Arbeitsalltag begleiten. Stolz präsentierten die Mädchen zum Abschluss in Kurzvorträgen das Erlernte des Tages.

www.girls-day.de

Umwelt-Talent School 2011

Vom 2. bis 4. November 2011 fand am Fraunhofer ISE erstmals die Umwelt-Talent-School statt. Dabei vermittelten erfahrene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler theoretische und praktische Kenntnisse rund um das Thema Solarenergie. Zu Gast waren naturwissenschaftlich-technisch interessierte Schülerinnen und Schüler der Klassenstufen 9–12/13. Gemeinsam wurde in Workshops getüftelt, gebastelt und geschraubt. Die Schülerinnen und Schüler beschäftigten sich mit der solaren Stromerzeugung, der Konzentration von Solarstrahlung oder der optischen Technologie für solare Anwendungen. Neben der praktischen Arbeit – etwa dem Bau einer Solarzelle – bot das Fraunhofer ISE ein informatives und vielfältiges Rahmenprogramm. Die erfolgreiche Veranstaltung in Zusammenarbeit mit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) wird in den nächsten drei Jahren fortgesetzt.

Schulaktion: »Solarforscher zu Gast in der Schule«

Die 2010 gestartete Kooperation mit dem Verein Solare Zukunft e. V. wurde auch 2011 fortgesetzt. Gemeinsam mit Vertretern des Vereins haben junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Fraunhofer ISE z. B. zehn Schulen in Freiburg und Umgebung besucht und dort den Unterricht mitgestaltet. Neben der Schilderung des eigenen Ausbildungswegs wurde das Thema Solarenergie in anschaulichen Experimenten vermittelt – eine willkommene Abwechslung zum Stundenplan.

ERTEILTE PATENTE

Vorrichtung zur Umwandlung und Speicherung von Energie:
Spies, Peter; Rohmer, Günter; Tübke, Jens; Hebling, Christopher;
Böttner, Harald, CN 101563787 A

Fuell Cell System in the Form of a Printed Circuit Board:
Schmitz, Andreas; Hebling, Christopher; Hahn, Robert;
Burger, Bruno, JP 4745611

Verfahren zur gleichzeitigen Rekristallisierung und Dotierung
von Halbleiterschichten und nach diesem Verfahren hergestellte
Halbleiterschichtsysteme: Reber, Stefan, EP 1 792 349 A1

Modifizierter Hopcalit-Katalysator, Verfahren zu dessen Herstellung
und dessen Verwenden: Susdorf, Alexander; Hübner, Peter;
Chigapov, Albert; Carberry, Brendon, DE 10 2006 018 529 A1

Anordnung mit Solarzelle und integrierter Bypass-Diode:
Riesen van, Sascha; Löckenhoff, Rüdiger; Strobl, Gerhard;
Dietrich, Ron; Koestler, Wolfgang, AU 2005306196 B2,
US 2008/0128014 A1

Vorrichtung mit einem ein Medium führenden Kanal und Verfahren
zur Entfernung von Einschlüssen: Koltay, Peter; Litterst, Christian;
Eccarius, Steffen, US 2008/0141861 A1

Schutzschalteinrichtung für ein Solarmodul: Burger, Bruno;
Schmidt, Heribert, EP 1 884 008 A1

Verfahren zum Betreiben einer Direktoxidationsbrennstoffzelle und
entsprechende Anordnung: Eccarius, Steffen; Litterst, Christian;
Koltay, Peter, EP 1 964 198 A1

Direktoxidationsbrennstoffzelle mit passiver Brennstoffzuführung
und Verfahren zu deren Betreiben: Eccarius, Steffen; Litterst,
Christian; Koltay, Peter, US 2009/0017357 A1

Wechselrichter mit integrierter Ansteuerung und Regelung für
einen Tracker: Burger, Bruno; Lerchenmüller, Hansjörg,
EP 2 100 199 A1

Zellverbinder zur elektrischen Kontaktierung von flächigen
Stromquellen sowie Verwendung: Wirth, Harry, US 2009/0318037 A1

Verfahren zur Metallisierung von Halbleiterbauelementen und
deren Verwendung: Grohe, Andreas; Nekarda, Jan-Frederik;
Schultz-Wittmann, Oliver, US 2009/0221112 A1

Photovoltaisches Modul und dessen Verwendung: Bett, Andreas;
Jaus, Joachim, CN 101548394 A, US 2009/0272427 A1

Verfahren zur Präzisionsbearbeitung von Substraten und dessen
Verwendung: Mayer, Kuno; Kray, Daniel; Glunz, Stefan; Preu, Ralf;
Mette, Ansgar; Grohe, Andreas; Aleman, Monica, EP 2 134 887 A1

Brennstoffzelle sowie Verfahren zu deren Herstellung: Oszcipok,
Michael; Eccarius, Steffen, DE 10 2007 014 046 A1

Solarelement mit gesteigerter Effizienz und Verfahren zur
Effizienzsteigerung: Goldschmidt, Jan Christoph; Löper, Philipp;
Peters, Marius, EP 2 195 859 A2

Bipolarplatte für einen PEM-Elektrolyseur: Hacker, Beatrice;
Jungmann, Thomas; Wittstadt, Ursula; Smolinka, Tom,
EP 2 201 157 A1

Steuerbare Umschaltvorrichtung für ein Solarmodul:
Burger, Bruno; Schmidt, Heribert, EP 2 179 451 A1

Fluidverteilungselement für eine fluidführende Vorrichtung,
insbesondere für ineinander verschachtelte mehrkanalartige
Fluidführungsapparate: Sicre, Benoit; Oltersdorf, Thore;
Hermann, Michael, DE 10 2007 056 995 A1

Messvorrichtung zur elektrischen Vermessung einer einseitig an
einer Messseite elektrisch kontaktierbaren Messstruktur:
Glatthaar, Markus; Rein, Stefan; Biro, Daniel; Clement, Florian;
Menkö, Michael; Krieg, Alexander, DE 10 2009 012 021 A1

Verfahren zur Bestimmung einer Struktur eines Halbleitermaterials
mit vordefinierten elektrooptischen Eigenschaften, Verfahren zu
dessen Herstellung sowie Halbleitermaterial: Peters, Marius; Bläsi,
Benedikt; Goldschmidt, Jan Christoph, DE 10 2010 008 905 B3

VORLESUNGEN UND SEMINARE

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Dr. Stefan Glunz

»Photovoltaische Energiekonversion«, Vorlesung SS 11,
Technische Fakultät

Dr. Stefan Glunz, Dr. Martin Schubert, Dr. Harry Wirth
»Crystalline Silicon Photovoltaics«, Vorlesung SS 11,
Master Online Photovoltaics (MOPV)

Dr. Stefan Glunz, Dr. Uli Würfel

»Fundamentals of Solar Cells«, Vorlesung WS 11/12,
Master Online Photovoltaics (MOPV)

Dr. Peter Kailuweit

»Selected Semiconductor Devices«, Seminar WS 10/11,
Master Online Photovoltaics (MOPV)

Dr. Werner Platzer

»Elective II – Energy Efficiency and Solar Thermal Energy«, Vorlesungsmodul WS 11/12, Zentrum für Erneuerbare Energien (ZEE),
Studiengang Renewable Energy Management (REM)

Dr. Werner Platzer, Dr. Ralf Preu, Dr. Christof Wittwer

»Technology I«, Vorlesung WS 10/11, Zentrum für Erneuerbare
Energien (ZEE), Studiengang Renewable Energy Management (REM)

Dr. Olivier Stalter

»Fundamentals of PV Systems«, Vorlesung WS 10/11 und WS 11/12,
Master Online Photovoltaics (MOPV)

Dr. Olivier Stalter

»Electrical Engineering and PV Power Electronics«, Vorlesung
WS 11/12, Master Online Photovoltaics (MOPV)

Prof. Dr. Eicke R. Weber, Dr. Werner Platzer, Korbinian Kramer

»Solarthermie«, Vorlesung WS 11/12, Fakultät für Physik und
Mathematik

Prof. Dr. Eicke R. Weber, Dr. Uli Würfel

»Photovoltaische Energiekonversion«, Vorlesung SS 11,
Fakultät für Physik und Mathematik

Prof. Dr. Eicke R. Weber, Dr. Uli Würfel,

»Photovoltaik«, Oberseminar SS 11 und WS 11/12,
Fakultät für Physik und Mathematik

Dr. Christof Wittwer

»Smart Grid and Autonomous Communities«, Vorlesung WS 11/12,
Master Online Photovoltaics (MOPV)

Duale Hochschule Ravensburg

Prof. Dr. Bruno Burger

»Solar-Technologien«, Vorlesung SS 11,
Studiengang Elektrotechnik-Automatisierungstechnik

M.Eng. Dirk Kranzer

»Leistungselektronik«, Vorlesung WS 10/11,
Studiengang Elektrotechnik-Automatisierungstechnik

Hector School, Karlsruhe

Prof. Dr. Bruno Burger

»Green Mobility Engineering – Power Electronics«,
Vorlesung WS 11/12

Hochschule Offenburg

Dr. Thomas Aicher

»Chemie«, Vorlesung WS 11/12, Studiengang Energiesystemtechnik

Dr. Doreen Kalz

»Wärme- und Raumlufttechnik«, Vorlesung SS 11,
Studiengang Verfahrenstechnik

Dipl.-Ing. Norbert Pfanner

»Solartechnologie«, Vorlesung SS 11, Studiengang Elektrotechnik/
Informationstechnik^{Plus}

Dr. Achim Schaadt

»Energieverfahrenstechnik«, Vorlesung WS 10/11,
Studiengang Elektrotechnik/Informationstechnik^{Plus}

KIT Karlsruher Institut für Technologie

Prof. Dr. Bruno Burger

»Leistungselektronische Systeme für regenerative Energiequellen«,
Vorlesung WS 11/12, Fakultät für Elektrotechnik und Informations-
technik

Dr. Heribert Schmidt

»Photovoltaische Systemtechnik«, Vorlesung SS 11,
Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

Staatliche Akademie der Bildenden Künste, Stuttgart

Dipl.-Ing. Florian Kagerer

»Bauökologie/Energie effizientes Bauen«, Vorlesung SS 11,
Studiengang Architektur

TFH Georg Agricola zu Bochum

Dr. Dietmar Borchert

»Photovoltaik«, Vorlesung SS 11, Fachbereich Maschinentechnik

Universität Kassel

Dipl.-Ing. Brisa Ortiz

»Hybrid System Simulation«, Seminar WS 10/11,
European Master in Renewable Energy

Universität Koblenz-Landau

Dr. Jens Pfafferott

»Solares Bauen«, Präsenzveranstaltung WS 10/11,
Fernstudiengang Energiemanagement

*Neben den genannten Lehrtätigkeiten an Hochschulen führen Wissen-
schaftlerinnen 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.*

Alink, R.; Gerteisen, D.

»Scanning Electron Microscopy«, in: PEM Fuel Cell Diagnostic Tools
Vol. 2, Wang, H.; Yuan, X.-Z.; Li, H., CRC Press Inc., Boca Raton, FL,
USA, 2011, Chapter 14, pp. 315-332, ISBN 978-1439839195

Hauser, H.; Bläsi, B.

»Oberflächentexturen für hocheffiziente Solarzellen durch Nanoim-
print«, in: Jahrbuch Optik und Feinmechanik 2011, Prenzel, W.-D.,
OPTIK-Verlag, Görlitz, Germany, 2011, ISBN 978-3-7949-8017-2

Hermann, M.

»FracTherm – Fractal-Like Hydraulic Channel Structures?«, in: Bio-
mimetics: Nature-Based Innovation, Bar-Cohen, Yoseph, CRC Press,
Boca Raton, FL, USA, 2011, Chapter 12.11, ISBN 978-1439834763

Melke, J.

»Study of the Ethanol Oxidation in Fuel Cell Operation Using X-Ray
Absorption Spectroscopy and Electrochemical Methods«, Der Andere
Verlag, Uelvesbüll, Germany, 2011, ISBN 978-3-86247-127-0

Schmidt, H.; Burger, B.; Schmid, J.

»Power conditioning for Photovoltaic Power Systems«, in: Handbook
of Photovoltaic Science and Engineering. 2nd Edition, Luque, A.;
Hegedus, S., Wiley InterScience, Hoboken, NJ, USA, 2011,
Chapter 21, pp. 954-983, ISBN 978-0-470-72169-8
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/9780470974704.ch21>)

Weber, E.; Thorwart, M.; Würfel, U.

»Quantum Efficiency in Complex Systems, Part I: Biomolecular
Systems«, in: Semiconductors and Semimetals Vol. 83, Elsevier,
Academic Press, New York, 2010, ISBN 978-0-12-375042-6

Weber, E.; Thorwart, M.; Würfel, U.

»Quantum Efficiency in Complex Systems, Part II: Biomolecular
Systems«, in: Semiconductors and Semimetals Vol. 85, Elsevier,
Academic Press, New York, 2011, ISBN 978-0-12-391060-8

REVIEWED JOURNALS

Andersson, L. M. (Biomolecular and Organic Electronics, Linköping, Sweden); Müller, C. (Institut de Ciència de Materials de Barcelona, Bellaterra, Spain); Badada, B. H. (Department of Physics University of Cincinnati, Cincinnati, OH, USA); Zhang, F. (Biomolecular and Organic Electronics Department of Physics Chemistry and Biology Linköping University, Linköping, Sweden); Würfel, U.; Inganäs, O. (Biomolecular and Organic Electronics Department of Physics Chemistry and Biology Linköping University, Linköping, Sweden) »Mobility and Fill Factor Correlation in Geminate Recombination Limited Solar Cells«, in: *Journal of Applied Physics* 110 (2011), No. 2, pp. 024509 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3609079>)

Assmus, M.; Jack, S.; Weiss, K.-A.; Köhl, M. »Measurement and Simulation of Vibrations of PV-Modules Induced by Dynamic Mechanical Loads«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19 (2011), No. 6, pp. 688-694 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1087>)

Balestrieri, M. (Physics Department, Bologna, Italy); Pysch, D.; Becker, J.-P. (Forschungszentrum Jülich IEK5-Photovoltaics, Jülich, Germany); Hermle, M.; Warta, W.; Glunz, S. W. »Characterization and Optimization of Indium Tin Oxide Films for Heterojunction Solar Cells«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011), No. 8, pp. 2390-2399 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.04.012>)

Bartsch, J.; Kamp, M.; Hörteis, M.; Gombert, A.; Reinecke, H. »Effects of Seed Layer and Substrate Morphology on Solar Cell Contacts Deposited by Light-Induced Plating«, in: *Journal of the Electrochemical Society* 158 (2011), No. 6, pp. H651-H658 (online available: <http://dx.doi.org/10.1149/1.3571266>)

Bertoni, M. I. (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA); Fenning, D. P. (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA); Rinio, M.; Holt, M. (Center for Nanoscale Materials Argonne National Laboratory, Argonne, WI, USA); Rose, V. (Advanced Photon Source Argonne National Laboratory, Argonne, WI, USA); Maser, J. (Center for Nanoscale Materials Argonne National Laboratory, Argonne, WI, USA); Buonassisi, T. (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA) »Nanoprobe X-ray Fluorescence Characterization of Defects in Large-Area Solar Cells«, in: *Energy & Environmental Science* (2011), No. 4, pp. 4252-4257 (online available: <http://dx.doi.org/10.1039/c1ee02083h>)

Breitenstein, O. (Max Planck Institute of Microstructure Physics, Halle, Germany); Bauer, J. (Max Planck Institute of Microstructure Physics, Halle, Germany); Bothe, K. (Institute for Solar Energy Research Hamelin, Emmerthal, Germany); Kwapil, W.; Lausch, D. (Fraunhofer Center for Silicon Photovoltaics, Halle, Germany); Rau, U. (Forschungszentrum Jülich IEF5-Photovoltaik, Jülich, Germany); Schmidt, J. (Institute for Solar Energy Research Hamelin, Emmerthal, Germany); Schneemann, M. (Forschungszentrum Jülich IEF5-Photovoltaik, Jülich, Germany); Schubert, M. C.; Wagner, J.-M. (Max Planck Institute of Microstructure Physics, Halle, Germany); Warta, W.

»Understanding Junction Breakdown in Multicrystalline Solar Cells«, in: *Journal of Applied Physics* 109 (2011), No. 7, pp. 071101 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3562200>)

Breitenstein, O. (Max Planck Institute of Microstructure Physics, Halle, Germany); Bauer, J. (Max Planck Institute of Microstructure Physics, Halle, Germany); Bothe, K. (Institute for Solar Energy Research Hamelin, Emmerthal, Germany); Hinken, D. (Institute for Solar Energy Research Hamelin, Emmerthal, Germany); Müller, J. (Institute for Solar Energy Research Hamelin, Emmerthal, Germany); Kwapil, W.; Schubert, M. C.; Warta, W.

»Can Luminescence Imaging Replace Lock-in Thermography on Solar Cells«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics* 1 (2011), No. 2, pp. 159-167 (online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2169394>)

Brinkmann, N. (Universität Konstanz, Constance, Germany); Pócza, D.; Mitchell, E. J. (School of Photovoltaic and Renewable Energy Engineering, Sydney, Australia); Reber, S. »3D Epitaxial Growth Through Holes for the Fabrication of Thin-Film Solar Cells«, in: *Journal of Crystal Growth* 335 (2011), No. 1, pp. 37-41 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcrysgro.2011.07.017>)

Coletti, G. (ECN Solar Energy, Petten, Netherlands); Bronsveld, P. C. (ECN Solar Energy, Petten, Netherlands); Hahn, G. (University of Konstanz, Constance, Germany); Warta, W.; Macdonald, D. (Australian National University, Canberra, Australia); Ceccaroli, B. (Marche AS, Vaagsbygd Kristiansand, Norway); Wambach, K. (Sunicon AG, Freiberg, Germany); Le Quang, N. (Photowatt International S.A.U., Bourgoin-Jallieu, France); Fernandez, J. M. (BP Solar, Alcobendas, Spain)

»Impact of Metal Contamination in Silicon Solar Cells«, in: *Advanced Functional Materials* 21 (2011), No. 5, pp. 879-890 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.201000849>)

REVIEWED JOURNALS

Drießen, M.; Merkel, B.; Reber, S.

»Advanced APCVD-Processes for High-Temperature Grown Crystalline Silicon Thin Film Solar Cells«, in: *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 11 (2011), No. 9, pp. 8174-8179
(online available: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2011.5079>)

Du, C. (Institute of Chemistry, Beijing, China); Li, C. (College of Chemistry Beijing Normal University, Beijing, China); Li, W. (Institute of Chemistry Chinese Academy of Sciences, Beijing, China); Chen, X. (Institute of Chemistry Chinese Academy of Sciences, Beijing, China); Bo, Z. (Institute of Chemistry Chinese Academy of Sciences, Beijing, China); Veit, C.; Ma, Z. (Department of Physics Chemistry and Biology Linköping University, Linköping, Sweden); Würfel, U.; Zhu, H. (Institute of Chemistry Chinese Academy of Sciences, Beijing, China); Hu, W. (Institute of Chemistry Chinese Academy of Sciences, Beijing, China); Zhang, F. (Department of Physics Chemistry and Biology Linköping University, Linköping, Sweden)

»9-Alkylidene-9H-Fluorene-Containing Polymer for High-Efficiency Polymer Solar Cells«, in: *Macromolecules (ACS)* 44 (2011), No. 19, pp. 7617-7624
(online available: <http://dx.doi.org/10.1021/ma201477b>)

Dupeyrat, P.; Ménézo, C. (Université de Savoie, Savoie Technolac, France); Wirth, H.; Rommel, M. (SPF University of Applied Sciences, Rapperswil, Switzerland)

»Improvement of PV Module Optical Properties for PV-Thermal Hybrid Collector Application«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011), No. 8, pp. 2028-2036
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.04.036>)

Dupeyrat, P.; Ménézo, C. (CETHIL, Lyon, France); Rommel, M. (SPF University of Applied Sciences, Rapperswil, Switzerland); Henning, H.-M.

»Efficient Single Glazed Flat Plate Photovoltaic-Thermal Hybrid Collector for Domestic Hot Water System«, in: *Solar Energy* 85 (2011), No. 7, pp. 1457-1468
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.04.002>)

Fallisch, A.; Biro, D.

»2-D SPICE Simulation and Analytical Calculation of Spreading Resistance Effects in Emitter Wrap-Through Cells With Nonsquare Via-Hole Pattern«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics* 1 (2011), No. 2, pp. 153-158
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2172190>)

Fellmeth, T.; Mack, S.; Bartsch, J.; Erath, D.; Jäger, U.; Preu, R.; Clement, F.; Biro, D.

»20.1% Efficient Silicon Solar Cell with a Aluminium Back Surface Field«, in: *IEEE Electron Device Letter* 32 (2011), No. 8, pp. 1101-1103
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2011.2157656>)

Geilker, J.; Kwapil, W.; Rein, S.

»Light-Induced Degradation in Compensated p- and n-Type Czochralski Silicon Wafers«, in: *Journal of Applied Physics* 109 (2011), No. 5, pp. 053718
(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3552302>)

Giesecke, J. A.; Michl, B.; Schindler, F.; Schubert, M. C.; Warta, W.

»Minority Carrier Lifetime of Silicon Solar Cells from Quasi-Steady-State Photoluminescence«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011), No. 7, pp. 1979-1982
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.02.023>)

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 (2011), No. 3, pp. 1011-1018
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.12.016>)

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.

»Experimental Analysis of Upconversion with Both Coherent Monochromatic Irradiation and Broad Spectrum Illumination«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011), No. 7, pp. 1960-1963
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.019>)

Gradmann, R.; Löper, P.; Künle, M.; Rothfelder, M.; Janz, S.; Hermle, M.; Glunz, S.

»Si and SiC Nanocrystals in an Amorphous SiC Matrix: Formation and Electrical Properties«, in: *physica Status Solidi C* 8 (2011), No. 3, pp. 831-834

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.201000176>)

Green, M. A. (University of New South Wales, Sydney, Australia); Emery, K. (National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA); Hishikawa, Y. (National Institute of Advanced Industrial Science and Technology, Ibaraki, Japan); Warta, W.

»Solar Cell Efficiency Tables (Version 37)«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 1 (2011), No. 19, pp. 84-92

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1088>)

Gundel, P.; Schubert, M. C.; Heinz, F. D.; Woehl, R.; Benick, J.; Giesecke, J. A.; Suwito, D.; Warta, W.

»Micro-Spectroscopy on Silicon Wafers and Solar Cells«, in: *Nanoscale Research Letters* (2011), No. 6, pp. 197

(online available: <http://dx.doi.org/10.1186/1556-276X-6-197>)

Gundel, P.; Suwito, D.; Jäger, U.; Heinz, F. D.; Warta, W.; Schubert, M. C.

»Comprehensive Microscopic Analysis of Laser-Induced High Doping Regions in Silicon«, in: *IEEE Transactions on Electron Devices* 58 (2011), No. 9, pp. 2874-2877

(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2011.2158649>)

Hampel, J.; Boldt, F. M.; Gerstenberg, H. (ZWE FRM-II der Technischen Universität München, Garching, Germany); Hampel, G. (Institute of Nuclear Chemistry Johannes Gutenberg-University, Mainz, Germany); Kratz, J. (Institute of Nuclear Chemistry Johannes Gutenberg-University, Mainz, Germany); Reber, S.; Wiehl, N. (Institute of Nuclear Chemistry Johannes Gutenberg-University, Mainz, Germany)

»Fast Determination of Impurities in Metallurgical Grade Silicon for Photovoltaics by Instrumental Neutron Activation Analysis«, in: *Applied Radiation and Isotopes* 69 (2011), No. 10, pp. 1365-1368

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apradiso.2011.05.024>)

Hartel, A. M. (IMTEK Faculty of Engineering, Freiburg, Germany); Hiller, D. (IMTEK Faculty of Engineering, Freiburg, Germany);

Gutsch, S. (IMTEK Faculty of Engineering, Freiburg, Germany);

Löper, P.; Estradé, S. (Departament d'Electrònica Universidad de Barcelona, Barcelona, Spain); Peiró, F. (Departament d'Electrònica Universidad de Barcelona, Barcelona, Spain); Garrido, B.

(Departament d'Electrònica Universidad de Barcelona, Barcelona, Spain); Zacharias, M. (IMTEK Faculty of Engineering, Freiburg, Germany)

»Formation of Size-Controlled Silicon Nanocrystals in Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition Grown SiO_xN_y/SiO₂ Superlattices«, in: *Thin Solid Films* 520 (2011), No. 1, pp. 121-125

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.06.084>)

Haunschild, J.; Reis, I. E.; Geilker, J.; Rein, S.

»Detecting Efficiency-Limiting Defects in Czochralski-Grown Silicon Wafers in Solar Cell Production Using Photoluminescence Imaging«, in: *physica status solidi – Rapid Research Letters* 5 (2011), No. 5-6, pp. 199-201

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201105183>)

Henninger, S.; Ehrenmann, J. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Janiak, C. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany)

»Water Adsorption Characteristics of Mil-101 for Heat Transformation Application of MOFs«, in: *European Journal of Inorganic Chemistry* (2011), No. 4, pp. 471-474

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/ejic.201190006>)

Henninger, S.; Munz, G.; Ratzsch, K.-F.; Schossig, P.

»Cycle Stability of Sorption Materials and Composites for the Use in Heat Pumps and Cooling Machines«, in: *Renewable Energy* 36 (2011), No. 11, pp. 3043-3049

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.03.032>)

Henninger, S.; Schmidt, F.; Henning, H.-M.

»Characterisation and Improvement of Sorption Materials with Molecular Modeling for the Use in Heat Transformation Applications«, in: *Adsorption* 17 (2011), No. 5, pp. 833-843

(online available: <http://dx.doi.org/10.1007/s10450-011-9342-6>)

REVIEWED JOURNALS

Hoheisel, R.; Schachtner, M.; Stämmler, E.; Bett, A. W.

»Determination of the Subcell Photovoltage in Multijunction Solar Cells via Voltage-Dependent Capacitance Analysis«, in: *Applied Physics Letters* 98 (2011), No. 25, pp. 251106

(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3601468>)

Hohl-Ebinger, J.; Warta, W.

»Uncertainty of the Spectral Mismatch Correction Factor in STC Measurements on Photovoltaic Devices«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19 (2011), No. 5, pp. 573-579

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1059>)

Hopman, S.; Mayer, K.; Fell, A.; Mesec, M.; Granek, F.

»Laser Cutting of Silicon with the Liquid Jet Guided Laser Using a Chlorine-Containing Jet Media«, in: *Applied Physics A* 3 (2011), No. 102, pp. 621-627

(online available: <http://dx.doi.org/10.1007/s00339-010-6155-5>)

Jäger, U.; Suwito, D.; Benick, J.; Janz, S.; Preu, R.

»A Laser Based Process for the Formation of a Local Back Surface Field for n-Type Silicon Solar Cells«, in: *Thin Solid Films* 519 (2011), No. 11, pp. 3827-3830

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.01.237>)

Jaus, J.; Bett, A. W.; Reinecke, H.; Weber, E. R.

»Reflective Secondary Optical Elements for Fresnel Lens Based Concentrator Modules«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19 (2011), No. 5, pp. 580-590

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1065>)

Kalz, D.; Pfafferoth, J.; Herkel, S.; Wagner, A. (University of Karlsruhe, Karlsruhe, Germany)

»Energy and Efficiency Analysis of Environmental Heat Sources in Combination with Heat Pump Systems: In-Use Performance«, in: *Renewable Energy* 36 (2011), No. 3, pp. 916-929

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.09.003>)

Kluska, S.; Granek, F.

»High Efficiency Silicon Solar Cells with Boron Local Back Surface Fields Formed by Laser Chemical Processing«, in: *IEEE Electron Device Letters* 32 (2011), No. 9, pp. 1257-1259

(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2011.2159699>)

Köhl, M.; Heck, M.; Wiesmeier, S.; Wirth, J.

»Modeling of the Nominal Operating Cell Temperature Based On Outdoor Weathering«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011), No. 7, pp. 1638-1646

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.020>)

Kopfer, J. M.; Keipert-Colberg, S.; Borchert, D.

»Capacitance-Voltage Characterization and Stability of SiO and SiN Coatings as Passivation Layers for Crystalline Silicon Solar Cells«, in: *Thin Solid Films* 519 (2011), No. 19, pp. 6525-6529

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2011.04.107>)

Kost, C.; Pfluger, B. (Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Karlsruhe, Germany); Eichhammer, W. (Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Karlsruhe, Germany); Ragwitz, M.

»Fruitful Symbiosis: Why an Export Bundled With Wind Energy is the Most Feasible Option for North African Concentrated Solar Power«, in: *Energy Policy* 39 (2011), No. 11, pp. 7136-7145

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.032>)

Krause, J.; Woehl, R.; Rauer, M.; Schmiga, C.; Wilde, J. (IMTEK Faculty of Engineering, Freiburg, Germany); Biro, D.

»Microstructural and Electrical Properties of Different-Sized Aluminum-Alloyed Contacts and Their Layer System on Silicon Surfaces«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011), No. 8, pp. 2151-2160

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.03.017>)

Kuhn, T. E.; Herkel, S.; Frontini, F. (Politecnico di Milano, Milano, Italy); Strachan, P. (University of Strathclyde, Glasgow, Great Britain); Kokogiannakis, G. (University of Strathclyde, Glasgow, Great Britain)

»Solar Control: A General Method for Modelling of Solar Gains Through Complex Facades in Building Simulation Programs«, in: *Energy and Buildings* 43 (2011), No. 1, pp. 19-27

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.07.015>)

- Kurtz, S. (National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA); Whitfield, K. (Miasolé, Santa Clara, CA, USA); Mani, G. T. (TUV Rheinland PTL, Tempe, AZ, USA); Köhl, M.; Miller, D. (National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA); Joyce, J. (Underwriters Laboratories Inc., Northbrook, IL, USA); Wohlgemuth, J. (BP Solar, Frederick, MD, USA); Bosco, N. (National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA); Kempe, M. (National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, USA); Zgonena, T. (Underwriters Laboratories Inc., Northbrook, IL, USA)
 »Evaluation of High-Temperature Exposure of Photovoltaic Modules«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19 (2011), No. 8, pp. 954-965
 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1103>)
- Kurz, T.; Keller, J.
 »Heat Management in a Portable High Temperature PEM Fuel Cell Module with Open Cathode«, in: *Fuel Cells* 11 (2011), No. 4, pp. 518-525
 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/face.201000109>)
- Kwapil, W.; Nievendick, J.; Zuschlag, A. (University of Konstanz Department of Physics, Constance, Germany); Gundel, P.; Schubert, M. C.; Warta, W.
 »Influence of Surface Texture on the Defect-Induced Breakdown Behavior of Multicrystalline Silicon Solar Cells«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*
- Li, W. (Department of Physics Linköping University, Linköping, Sweden); Zhou, Y. (Department of Physics Chemistry and Biology Linköping University, Linköping, Sweden); Andersson, B. V. (Department of Physics Chemistry and Biology Linköping University, Linköping, Sweden); Thomann, Y. (Freiburg Materials Research Centre, Freiburg, Germany); Veit, C.; Tvingstedt, K. (Department of Physics Chemistry and Biology Linköping University, Linköping, Sweden); Qin, R. (College of Chemistry Beijing Normal University, Beijing, China (R.O.)); Bo, Z. (College of Chemistry Beijing Normal University, Beijing, China (R.O.)); Inganäs, O. (Department of Physics Chemistry and Biology Linköping University, Linköping, Sweden); Würfel, U.
 »The Effect of Additive on Performance and Shelf-Stability of HXS-1/PCBM Photovoltaic Devices«, in: *Organics Electronics* 12 (2011), No. 9, pp. 1544-1551
 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.orgel.2011.05.028>)
- Lohmüller, E.; Thaidigsmann, B.; Pospischil, M.; Jäger, U.; Mack, S.; Specht, J.; Nekarda, J.; Retzlaff, M.; Krieg, A.; Clement, F.; Wolf, A.; Wolf, A.; Biro, D.; Preu, R.
 »20% Efficient Passivated Metal Wrap Through Solar Cells on Boron-Doped Cz-Silicon«, in: *IEEE Electron Device Letters* 32 (2011), No. 12, pp. 1719-1721
 (online available: <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2011.2167709>)
- Löper, P.; Müller, R.; Hiller, D. (IMTEK Faculty of Engineering, Freiburg, Germany); Barthel, T. (Helmholtz-Centre Berlin for Materials and Energy, Berlin, Germany); Malguth, E. (Helmholtz-Centre Berlin for Materials and Energy, Berlin, Germany); Janz, S.; Goldschmidt, J. C.; Hermle, M.; Zacharias, M. (IMTEK Faculty of Engineering, Freiburg, Germany)
 »Quasi Fermi Level Splitting in Ideal Silicon Nanocrystal Superlattices«, in: *Physical Review B* 84 (2011), No. 19, pp. 195317
 (online available: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.84.195317>)
- Mack, S.; Wolf, A.; Brosinsky, C.; Schmeisser, S.; Kimmerle, A.; Saint-Cast, P.; Hofmann, M.; Biro, D.
 »Silicon Surface Passivation by Thin Thermal Oxide / PECVD Layer Stack Systems«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics* 1 (2011), No. 2, pp. 135-145
 (online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2173299>)
- Mack, S.; Wolf, A.; Walczak, A.; Thaidigsmann, B.; Wotke, E. A.; Spiegelman, J.; Preu, R.; Biro, D.
 »Properties of Purified Direct Steam Grown Silicon Thermal Oxides«, in: *IEEE Transactions on Electron Devices* No. 95 (9) (2011), pp. 2570-2575
 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.03.002>)
- Meyer, M.; Melke, J.; Gerteisen, D.
 »Modelling and Simulation of Direct Ethanol Fuel Cell Considering Multistep Electrochemical Reactions, Transport Processes and Mixed Potentials«, in: *Electrochimica Acta* (56) (2011), No. 11, pp. 4299-4307
 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.electacta.2011.01.070>)
- Mingirulli, N.; Stüwe, D.; Specht, J.; Fallisch, A.; Biro, D.
 »Screen-Printed Emitter-Wrap-Through Solar Cell With Single Step Side Selective Emitter With 18.8% Efficiency«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19 (2011), No. 3, pp. 366-374 (online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1022>)

REVIEWED JOURNALS

- Mitchell, B. (University of New South Wales, Sydney, Australia); Peharz, G.; Siefer, G.; Peters, M.; Gandy, T.; Goldschmidt, J. C.; Bennick, J.; Glunz, S. W.; Bett, A. W.; Dimroth, F.
»Four-Junction Spectral Beam-Splitting Photovoltaic Receiver with High Optical Efficiency«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19 (2011), No. 1, pp. 61-72
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.988>)
- Mitchell, E. J.; Brinkmann, N.; Reber, S.
»Progress with Epitaxy Wrap-Through Crystalline Silicon Thin-Film Solar Cells«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19 (2011), No. 6, pp. 706-714
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1091>)
- Montesdeoca-Santana, A.; González-Díaz, B.; Jiménez-Rodríguez, E. (Universidad de La Laguna. Avda. Astrofísico Francisco Sánchez, La Laguna, Spain); Ziegler, J.; Velázquez, J. J. (Universidad de La Laguna. Avda. Astrofísico Francisco Sánchez, La Laguna, Spain); Müller, S.; Borchert, D.; Guerrero-Lemus, R. (Universidad de La Laguna. Avda. Astrofísico Francisco Sánchez, La Laguna, Spain)
»Influence of Stain Etching on Low Minority Carrier Lifetime Areas of Multicrystalline Silicon for Solar Cells«, in: *Material Science and Engineering B* 176 (2011), No. 18, pp. 1541-1545
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mseb.2011.09.029>)
- Montesdeoca-Santana, A.; Jiménez-Rodríguez, E. (Departamento de Física Básica Universidad de La Laguna, La Laguna, SIC de Tenerife, Spain); González-Díaz, B. (Departamento de Física Básica Universidad de La Laguna, La Laguna, SIC de Tenerife, Spain); Díaz-Herrera, B. (Departamento de Física Básica Universidad de La Laguna, La Laguna, SIC de Tenerife, Spain); Rinio, M.; Borchert, D.; Hernández-Rodríguez, C. (Departamento de Física Básica Universidad de La Laguna, La Laguna, SIC de Tenerife, Spain); Guerrero-Lemus, R. (Departamento de Física Básica Universidad de La Laguna, La Laguna, SIC de Tenerife, Spain)
»Phosphorous Gettering in Acidic Textured Multicrystalline Solar Cells«, in: *physica status solidi (c)* 8 (2011), No. 3, pp. 743-746
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssc.201000230>)
- Nievendick, J.; Zimmer, M.; Demant, M.; Krieg, A.; Rein, S.; Rentsch, J. »In-Line Measurement of 'Trench Structures' Caused by the Texturization of mc-Silicon Solar Cells«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011), No. 11, pp. 3142-3147
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.06.030>)
- Peharz, G.; Ferrer Rodríguez, J. P. (ISFOC, Puertollano, Spain); Siefer, G.; Bett, A. W.
»A Method for Using CPV Modules as Temperature Sensors and its Application to Rating Procedures«, in: *Solar Energy Materials & Solar Cells* 95 (2011), No. 10, pp. 2734-2744
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.03.030>)
- Peharz, G.; Ferrer-Rodríguez, J. P.; Siefer, G.; Bett, A. W.
»Investigations on the Temperature Dependence of CPV Modules Equipped with Triple-Junction Solar Cell«, in: *Progress in Photovoltaics Research and Application* 19 (2011), No. 1, pp. 54-60
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.987>)
- Peike, C.; Kaltenbach, T.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.
»Non-Destructive Degradation Analysis of Encapsulants in PV-Modules by Raman-Spectroscopy«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011), No. 7, pp. 1686-1693
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.01.030>)
- Peters, M.; Goldschmidt, J. C.; Bläsi, B.
»Efficiency Limit and Example of a Photonic Solar Cell«, in: *Journal of Applied Physics* 110 (2011), No. 4, pp. 043104
(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3622669>)
- Peters, M.; Goldschmidt, J. C.; Fernandez, J.; Siefer, G.; Bläsi, B.
»Directionally Selective Light Trapping in a Germanium Solar Cell«, in: *Optics Express* 19 (2011), No. S2, pp. A136-A145
(online available: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.19.00A136>)
- Pfafferoth, J.; Fischer, M.; Strohmeyer, T.; Wirth, D.
»Ein einfaches Modell zur Vorhersage der Fassaden- und Grenzschichttemperatur«, in: *Bauphysik* 33 (2011), No. 3, pp. 150-157
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/bapi.201110018>)
- Pfafferoth, J.; Inard, C. (University of La Rochelle, La Rochelle, France); Ghiaus, C. (INSA-Lyon CETHIL CNRS, Villeurbanne, France)
»Free-Running Temperature and Potential for Free Cooling by Ventilation: A Case Study«, in: *Energy and Buildings* 43 (2011), No. 10, pp. 2705-2711
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.06.017>)

Pfafferott, J.; Nüßle, F. (ZENT-FRENGER Gesellschaft für Gebäudetechnik, Heppenheim, Germany)

»Kühldeckensystem mit Aktivierung der Speichermasse der Betondecke«, in: *Bauphysik* 33 (2011), No. 1, pp. 43-48
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/bapi.201110005>)

Pysch, D.; Bivour, M.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Amorphous Silicon Carbide Heterojunction Solar Cells on p-Type Substrates«, in: *Thin Solid Films* 519, No. 1 (2011), pp. 2550-2554
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2010.12.028>)

Pysch, D.; Meinhardt, C.; Harder, N.-P.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Analysis and Optimization Approach for the Doped Amorphous Layers of Silicon Heterojunction Solar Cells«, in: *Journal of Applied Physics* 110 (2011), pp. 094516
(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3650255>)

Qun, B. (Institute for Solar Energy System Sun Yat-sen University, Guangzhou, China (R.O.)); Haker, M.; Borchert, D.; Hui, S. (Institute for Solar Energy System Sun Yat-sen University, Guangzhou, China (R.O.))

»Study of Large Area Hydrogenated Microcrystalline Silicon P-Layers for Back Surface Field in Crystalline Silicon Solar Cells«, in: *Science China Technological Sciences* 54 (2011), No. 1, pp. 63-69
(online available: <http://dx.doi.org/10.1007/s11431-010-4162-6>)

Rauer, M.; Schmiga, C.; Woehl, R.; Rühle, K.; Hermle, M.; Hörteis, M.; Biro, D.; Glunz, S.

»Investigation of Aluminum-Alloyed Local Contacts for Rear Surface-Passivated Silicon Solar Cells«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics* 1 (2011), No. 1, pp. 22-28
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2161864>)

Rauer, M.; Woehl, R.; Rühle, K.; Schmiga, C.; Hermle, M.; Hörteis, M.

»Aluminium Alloying in Local Contact Areas on Dielectrically Passivated Rear Surfaces of Silicon Solar Cells«, in: *IEEE Electron Device Letters* 32 (2011), No. 7, pp. 916-918
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2011.2143385>)

Reichel, C.; Bivour, M.; Granek, F.; Glunz, S. W.

»Improved Diffusion Profiles in Back-Contacted Back-Junction Silicon Solar Cells with an Overcompensated Boron-Doped Emitter«, in: *Physica Status Solidi A* 208 (2011), No. 12, pp. 2871-2883
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201127199>)

Reichel, C.; Granek, F.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Investigation of Electrical Shading Effects in Back-Contacted Back-Junction Silicon Solar Cells Using the Two-Dimensional Charge Collection Probability and the Reciprocity Theorem«, in: *Journal of Applied Physics* 109 (2011), No. 2, pp. 024507
(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3524506>)

Richter, A.; Benick, J.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Excellent Silicon Surface Passivation with 5 Å Thin ALD Al₂O₃ Layers: Influence of Different Thermal Post-Deposition Treatments«, in: *physica status solidi – Rapid Research Letters* 5 (2011), No. 5-6, pp. 202-204
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201105188>)

Rinio, M.; Fenning, D. P. (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA); Hofstetter, J. (Instituto de Energia Solar Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain); Bertoni, M. I. (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA); Hudelson, S. (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA); Lelièvre, J. F. (Centro de Tecnología del Silicio Solar, Getafe, Spain); Lai, B. (Advanced Photon Source Argonne National Laboratory, Argonne, WI, USA); del Canizo, C. (Instituto de Energia Solar Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain); Buonassisi, T. (Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, USA)
»Iron Distribution in Silicon after Solar Cell Processing: Synchrotron Analysis and Predictive Modeling«, in: *Applied Physics Letters* 98 (2011), No. 16, pp. 162103
(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3575583>)

Rinio, M.; Yodyunyong, A.; Keipert-Colberg, S.; Borchert, D.; Montesdeoca-Santana, A.

»Recombination in Ingot Cast Silicon Solar Cells«, in: *Physica Status Solidi A* 208 (2011), No. 4, pp. 760-768
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201084022>)

Rinio, M.; Yodyunyong, A.; Keipert-Colberg, S.; Botchak Mouafi, Y. P.; Borchert, D.; Montesdeoca-Santana, A. (Universidad de La Laguna, La Laguna, Spain)

»Improvement of Multicrystalline Silicon Solar Cells by a Low Temperature Anneal After Emitter Diffusion«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 19 (2011), No. 2, pp. 165-169
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1002>)

REVIEWED JOURNALS

Rönsch, S.; Hoheisel, R.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Subcell I-V Characteristic Analysis of GaInP/GaInAs/Ge Solar Cells Using Electroluminescence Measurements«, in: *Applied Physics Letters* 98 (2011), No. 25, pp. 251113 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3601472>)

Rosenits, P.; Kopp, F.; Reber, S.

»Epitaxially Grown Crystalline Silicon Thin-Film Solar Cells Reaching 16.5% Efficiency with Basic Cell Process«, in: *Thin Solid Films* 519 (2011), No. 10, pp. 3288-3290 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tsf.2010.12.150>)

Rosenits, P.; Roth, T. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany); Glunz, S. W.

»Erratum on 'Determining the Defect Parameters of the Deep Aluminium-Related Defect Center in Silicon' [Appl. Phys. Lett. 91, 122109 (2007)]«, in: *Applied Physics Letters* 99 (2011), No. 23, pp. 239904 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3652753>)

Rüdiger, M.; Rauer, M.; Schmiga, C.; Hermle, M.

»Effect of Incomplete Ionization for the Description of Highly Aluminum-Doped Silicon«, in: *Journal of Applied Physics* 110 (2011), No. 2, pp. 024508-024515 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3603043>)

Schäfer, S. (Robert Bosch GmbH, Gerlingen-Schillerhöhe, Germany);

Petersen, A. (Robert Bosch GmbH, Gerlingen-Schillerhöhe, Germany);

Wagner, T. A. (Robert Bosch GmbH, Gerlingen-Schillerhöhe, Germany);

Kniprath, R. (Robert Bosch GmbH, Gerlingen-Schillerhöhe, Germany);

Lingenfeller, D. (Robert Bosch GmbH, Gerlingen-Schillerhöhe, Germany);

Zen, A. (Robert Bosch South East Asia Pte Ltd, Singapore, Singapore);

Kirchartz, T. (IEK5-Photovoltaik Forschungszentrum

Jülich, Jülich, Germany); Zimmermann, B.; Würfel, U.; Feng, X.

(Darmstadt University of Technology, Darmstadt, Germany);

Mayer, T. (Darmstadt University of Technology, Darmstadt, Germany)

»Influence of the Indium Tin Oxide/Organic Interface on Open-Circuit Voltage, Recombination, and Cell Degradation in Organic Small-Molecule Solar Cells«, in: *Physical Review B* 83 (2011), No. 16, pp. 165311

(online available: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.83.165311>)

Schick Tanz, M.; Wapler, J. (PSE-AG, Freiburg, Germany);

Henning, H.-M.

»Primary Energy and Economic Analysis of Combined Heating, Cooling and Power Systems«, in: *Energy* 36 (2011), No. 1, pp. 575-585, No. 1

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2010.10.002>)

Schillinger, K.; Janz, S.; Reber, S.

»Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition of 3C-SiC for Silicon Thin-Film Solar Cells on Various Substrates«, in: *Journal of Nanoscience and Nanotechnology* 11 (2011), No. 9, pp. 8108-8113 (online available: <http://dx.doi.org/10.1166/jnn.2011.5062>)

Schindler, F.; Geilker, J.; Kwapil, W.; Warta, W.; Schubert, M. C.

»Hall Mobility in Multicrystalline Silicon«, in: *Journal of Applied Physics* 110 (2011), No. 4, pp. 043722

(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3622620>)

Schön, J.; Habenicht, H.; Schubert, M. C.; Warta, W.

»Understanding the Distribution of Iron in Multicrystalline Silicon after Emitter Formation: Theoretical Model and Experiments«, in: *Journal of Applied Physics* 109 (2011), No. 6, pp. 063717 (online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3553858>)

Schubert, M. C.; Habenicht, H.; Warta, W.

»Imaging of Metastable Defects in Silicon«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics* 1 (2011), No. 2, pp. 168-173

(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2011.2169942>)

Seiffe, J.; Gautero, L.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.; Eichel, R. A.; Weber, S.

»Surface Passivation of Crystalline Silicon by PECVD Double layers of Silicon-Rich Silicon Oxynitride«, in: *Journal of Applied Physics* 109 (2011), No. 3, pp. 034105

(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3544421>)

Seiffe, J.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Charge Carrier Trapping at Passivated Silicon Surfaces«, in: *Journal of Applied Physics* 109 (2011), No. 6, pp. 064505

(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3555622>)

Thaidigsmann, B.; Lohmüller, E.; Jäger, U.; Mack, S.; Lottspeich, F.; Spribille, A.; Birmann, K.; Erath, D.; Wolf, A.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.

»Large-Area P-Type HIP-MWT Silicon Solar Cells with Screen Printed Contacts Exceeding 20% Efficiency«, in: *physica status solidi – Rapid Research Letters* 5 (2011), No. 8, pp. 286-288

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201105311>)

Trupke, T. (BT Imaging, Surry Hills, Australia); Nyhus, J. (REC Wafer Norway AS, Porsgrunn, Norway); Haunschild, J.

»Luminescence Imaging for Inline Characterisation in Silicon Photovoltaics«, in: *physica status solidi – Rapid Research Letters* 5 (2011), No. 4, pp. 131-137

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201084028>)

Winter, D.; Koschikowski, J.

»Membrane Distillation Desalination: Experimental Studies on Full Scale Spiral Wound Modules«, in: *Journal of Membrane Science* 375 (2011), No. 1-2, pp. 104-112

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2011.03.030>)

Woehl, R.; Gundel, P.; Rühle, K.; Heinz, F. D.; Rauer, M.; Schmiga, C.; Schubert, M. C.; Warta, W.; Biro, D.

»Evaluating the Aluminum-Alloyed p+-Layer of Silicon Solar Cells by Emitter Saturation Current Density and Optical Microspectroscopy Measurements«, in: *IEEE Transactions on Electron Devices* 58 (2011), No. 2, pp. 441-447

(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2010.2093145>)

Woehl, R.; Krause, J.; Granek, F.; Biro, D.

»19,7% Efficient All Screen-Printed Back-Contact Back-Junction Silicon Solar Cell With Aluminum-Alloyed Emitter«, in: *Electron Device Letters* 32 (2011), No. 3, pp. 345-347

(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/LED.2010.2097238>)

Zimmermann, B.; Schleiermacher, H.-F. (Freiburg Material Research Centre, Freiburg, Germany); Niggemann, M.; Würfel, U.

»ITO-Free Flexible Inverted Organic Solar Cell Modules with High Fill Factor Prepared by Slot Die Coating«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells* 95 (2011), No. 7, pp. 1587-1589

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2010.11.025>)

Alle weiteren Veröffentlichungen finden Sie im Internet unter:
www.ise.fraunhofer.de/veroeffentlichungen

VORTRÄGE

Eingeladene Vorträge auf internationalen Konferenzen und Workshops

*Alink, R.; Henninger, S.; Schwager, M.; Hügenell, P.; Mérida, W. (University of British Columbia, Vancouver, Canada)
»Water Sorption of Commercial Membrane Electrode Assemblies«, ECS Binual Meeting, Electrochemical Society, Montreal, Canada, 3.5.2011*

*Bett, A. W.
»Hochkonzentrierende Photovoltaik: Entwicklungsstand und Perspektiven«, Arbeitskreis Energie 2011, DPG-Jahrestagung, Dresden, Germany, 14.–17.3.2011*

*Bett, A. W.
»III-V-Based Multi-Junction Solar Cells Used in Space and Concentrator PV«, German Polish Conference on Crystal Growth (GPCCG) 2011, DGKK, Frankfurt (Oder)/Slubice, Germany, 14.–16.3.2011*

*Bett, A. W.
»Status und Perspektiven der Konzentrator-technologie«, Zukunftsforum Adlershof 2011, IGAF e.V., WISTA-MG, DKB Management School, Berlin, Germany, 4.5.2011*

*Bett, A. W.; Essig, S.; Kellenbenz, R.; Klinger, V.; Roesener, T.; Dimroth, F.
»Research on III-V-based Concentrator Solar Cells«, ICMAT2011, MRS Singapore, Singapore, Singapore, 26.6–1.7.2011*

*Dimroth, F.; Bett, A. W.; Dreyer, K.; Essig, S.; Kellenbenz, R.; Klinger, V.; Oliva, E.; Roesener, T.; Siefert, G.; Wekkeli, A.; Weuffen, C.
»III-V Multi-Junction Solar Cells and their Application in Concentrator PV Systems«, PVTC 2011, Aix-en-Provence, France, 25.–27.5.2011*

*Dimroth, F.; Bett, A. W.; Dreyer, K.; Essig, S.; Kellenbenz, R.; Klinger, V.; Oliva, E.; Roesener, T.; Siefert, G.; Wekkeli, A.; Weuffen, C.
»Modern Architectures for III-V Multi-Junction Solar Cells«, EW-MOVPE 2011, Wroclaw, Poland, 5.–8.6.2011*

*Dimroth, F.; Bett, A. W.; Dreyer, K.; Essig, S.; Kellenbenz, R.; Klinger, V.; Oliva, E.; Roesener, T.; Siefert, G.; Wekkeli, A.; Weuffen, C.
»Technologies for Next Generation III-V Multi-Junction Solar Cells«, IOP Meeting: Perspectives on Materials and Technologies 2011, Manchester, Great Britain, 30.6.2011*

*Dimroth, F.; Bett, A. W.; Siefert, G.; Wiesenfarth, M.
»Development of High Efficiency Solar Cells and Modules«, Zero Emission Rome Conference 2011, Rome, Italy, 15./16.9.2011*

*Fischer, S.; Heiko, S.; Hallermann, F. (RWTH, Aachen, Germany); von Plessen, G. (RWTH, Aachen, Germany); Krämer, K. (University of Bern, Bern, Switzerland); Biner, D. (University of Bern, Bern, Switzerland); Hermle, M.; Goldschmidt, J. C.
»Characterization And Simulation of Upconversion Processes«, Quantsol 2011, Helmholtz-Zentrum Berlin, Bad Hofgastein, Austria, 20.–26.3.2011*

*Gerteisen, D.; Mérida, W. (University of British Columbia, Vancouver, Canada); Kurz, T.; Alink, R.; Spadinger, A.; Schwager, M.; Hebling, C.
»Spatially Resolved Voltage, Current and Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements«, 8th Symposium on Fuel Cell Modeling and Experimental Validation 2011, FZ Jülich, Bonn, Germany, 8./9.3.2011*

*Gerteisen, D.; Mérida, W. (University of British Columbia, Vancouver, Canada); Kurz, T.; Alink, R.; Spadinger, A.; Schwager, M.; Hebling, C.
»Ortsaufgelöste Charakterisierung von Brennstoffzellen und Zellstapeln«, Brennstoffzellen – Materialien und Systeme, AGEF e.V. & Fraunhofer ICT, Pfinztal, Germany, 22./23.3.2011*

*Gölz, S.; Bär, C.; Oellerich, A.
»Was macht der Endkunde mit Smart Metering?«, E-World Energy & Water 2011, Essen, Germany, 8.2.2011*

*Groos, U.; Sadeler, C.; Georg, A.; Kurz, T.; Gerteisen, D.; Hebling, C.
»Degradation of Membrane Fuel Cells and Systems«, f-cell 2011, Peter Sauber Agentur, Stuttgart, Germany, 26./27.9.2011*

*Hebling, C.
»R&D Challenges in Solar Energy«, Vision Workshop, Indian Oil Corporation, Jodhpur, India, 27./28.2.2011*

*Helmers, H.; Boos, A.; Jetter, F.; Heimsath, A.; Wiesenfarth, M.; Bett, A. W.
»Outdoor Test Set-up for Concentrating Photovoltaic and Thermal (CPVT) Systems«, CPV-7 2011, NREL, Las Vegas, NV, USA, 5./6.4.2011*

Henning, H.-M.

»Solar Air-Conditioning and Refrigeration – the Overall Status and Perspectives«, IEA SHC & ECES Workshop 2011, Rosenheim, Germany, 8.11.2011

Henning, H.-M.

»Status Quo and Future of Solar Energy: Electricity, Heating and Cooling«, Solar Summit 2011, Freiburg, Germany, 14./15.11.2011

Henning, H.-M.; Ruschenburg, J.; Herkel, S.

»Combination of Solar Thermal and Heat Pumps«, Solar Summit 2011, Freiburg, Germany, 14./15.11.2011

Hönig, R.; Pospischil, M.; Fellmeth, T.; Bartsch, J.; Erath, D.; Specht, J.; Clement, F.; Biro, D.; König, M. (Heraeus HPM Business Unit PV, Hanau, Germany); Neidert, M. (Heraeus HPM Business Unit PV, Hanau, Germany); Henning, A. (Heraeus HPM Business Unit PV, Hanau, Germany); Mohr, C. (Heraeus HPM Business Unit PV, Hanau, Germany); Hörteis, M. (Heraeus HPM Business Unit PV, Hanau, Germany); Zhang, W. (Heraeus HPM Business Unit PV, Hanau, Germany)

»Thick Film Metallization for Contacting Emitters with High Sheet Resistance – Current Technologies and New Approaches«, 3rd Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells, Charleroi, Belgium, 24.–26.10.2011

Jacob, D.; Burhenne, S.; Herkel, S.; Wagner, A. (KIT, Karlsruhe, Germany); Dodier, R. (Infotility Inc., Boulder, CO, USA); Henze, G. P. (University of Colorado, Boulder, CO, USA)

»Comparing Two Methods of Stochastic Modeling for Buildings«, Building Simulation 2011, IBPSA – International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia, 14.–16.11.2011

Jacob, D.; Burhenne, S.; Neumann, C.; Herkel, S.

»A Cost-Effective Model- and Measurement-Based Methodology for Ongoing Commissioning«, Building Simulation 2011, IBPSA – International Building Performance Simulation Association, Sydney, Australia, 14.–16.11.2011

Kailuweit, P.; Philipps, S.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Photovoltaic Solar Energy – Technical and Economical Trends«, Workshop über Erneuerbare Energien 2011, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago de Chile, Chile, 13./14.4.2011

Kailuweit, P.; Philipps, S.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Photovoltaic Solar Energy – State of the Art and High Efficiency Solar Cells«, Workshop über Erneuerbare Energien 2011, Universidad Técnica Federico Santa María, Santiago de Chile, Chile, 13./14.4.2011

Kiefer, K.; Dirnberger, D.

»Langzeiterfahrungen mit kommerziellen PV-Kraftwerken«, 26. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2011, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany, 2.–4.3.2011

Kwapil, W.; Gundel, P.; Schubert, M. C.; Zuschlag, A. (University of Konstanz, Konstanz, Germany); Seifert, W. (BTU Cottbus, Cottbus, Germany); Rinio, M.; Martinez-Criado, G. (ESRF, Grenoble, France); Zizak, I. (BESSY, Berlin, Germany); Sans, J. A. (ESRF, Grenoble, France); Warta, W.

»Looking Into Solar Cells with X-Ray Eyes – Impact of Metallic Precipitates on mc-Si Solar Cell Behavior«, Energy Workshop 2011, ESRF, Grenoble, France, 7.–10.2.2011

Philipps, S. P.; Bett, A. W.; Dimroth, F.; Kailuweit, P.; Kellenbenz, R.; Klinger, V.; Oliva, E.; Roesener, T.; Siefer, G.; Welsch, E.

»Development of High Efficiency III-V Solar Cells at Fraunhofer ISE«, Seminar des Instituts für Silizium-Photovoltaik, Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie, Berlin, Germany, 3.2.2011

Rau, S.; Fuentes, R. (University of South Carolina, Columbia, SC, USA); Smolinka, T.; Weidner, J. (University of South Carolina, Columbia, SC, USA)

»Geträgerte nano-strukturierte Katalysatoren für eine hocheffiziente Wasserstoffproduktion mittels PEM-Elektrolyse«, Brennstoffzellen – Materialien und Systeme, AGEF e.V. & Fraunhofer ICT, Pfinztal, Germany, 22./23.3.2011

Rau, S.; Yanwouo, A.; Peharz, G.; Smolinka, T.

»High Efficient Solar Hydrogen Generation Using a HyCon® System«, 15th European Fuel Cell Forum 2011, European Fuel Cell Forum AG, Lucerne, Switzerland, 28.6.–1.7.2011

Reber, S.; Riepe, S.

»Silicon Material for High Efficiency, Low-Cost Solar Cells«, Solar Summit 2011, Freiburg, Germany, 14./15.11.2011

VORTRÄGE

Roesener, T.; Guter, W.; Klinger, V.; Schöne, J.; Philipps, S.; Kellenbenz, R.; Steiner, M.; Oliva, E.; Wekkeli, A.; Welser, E.; Bett, A. W.; Dimroth, F.

»Metamorphic Buffers for III-V Multi-Junction Solar Cells«, MRS Spring Meeting 2011, Material Research Society, San Francisco, CA, USA, 25.–29.4.2011

Rogalla, S.

»Messtechnische Nachweisverfahren von Netzzrückwirkungen und Kraftwerkseigenschaften bei PV-Anlagen am MS-Netz«, Elektrische Eigenschaften von Erzeugungsanlagen an Hoch- und Mittelspannungsnetzen 2011, FGH-Seminar, Hannover, Germany, 16./17.3.2011

Rogalla, S.

»Messtechnische Nachweisverfahren von Netzzrückwirkungen und Kraftwerkseigenschaften im Rahmen der Typprüfungen nach FGW-TR3«, Elektrische Eigenschaften von Erzeugungsanlagen an Hoch- und Mittelspannungsnetzen 2011, FGH-Seminar, Hannover, Germany, 13./14.9.2011

Rogalla, S.

»The Role of PV Inverter in the Process of Grid Stabilization – Experiences in Testing Central Inverters According to the BDEW-Guideline«, PHOTON's 2nd PV Inverter Conference 2011, Photon Europe, Berlin, Germany, 12.5.2011

Sadeler, C.; Georg, A.; Kurz, T.; Gerteisen, D.; Groos, U.; Hebling, C. »Influence of Air Contaminants on PEFC-Performance«, 2nd International Workshop on Degradation Issues of Fuel Cells 2011, Joint Research Center, Thessaloniki, Greece, 21.–23.9.2011

Sadeler, C.; Kurz, T.; Keller, S.; Meder, Q.

»Fertigungs- und betrieboptimierte Brennstoffzellenstapel«, Brennstoffzellen – Materialien und Systeme, AGEF e.V. & Fraunhofer ICT, Pfinztal, Germany, 22./23.3.2011

Saint-Cast, P.; Haunschild, J.; Schwab, C.; Billot, E.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Metal Pinning through Rear Passivation Layers: Characterization and Effects on Solar Cells«, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011

Schwab, C.; Thaidigsmann, B.; Linse, M.; Wolf, A.; Clement, F.; Prince, A. (DuPont, Bristol, UK); Young, R. (DuPont, Bristol, UK); Weigand, P. (DuPont de Nemours, Neu Isenburg, Germany) »Screen Printed Al-Pastes for LFC Solar Cells«, 3rd Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells, Charleroi, Belgium, 24.–26.10.2011

Smolinka, T.; Garche, J. (FCBAT, Ulm, Germany)

»Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse«, Strategieplattform Power to Gas – Workshop Elektrolyse, DENA, Berlin, Germany, 18.10.2011

Smolinka, T.; Garche, J. (FCBAT, Ulm, Germany); Hebling, C.; Ehret, O. (NOW, Berlin, Germany)

»Water Electrolyser for Hydrogen Storage – Study on State of the Art of the Technology and Future Development Trends«, 6th International Conference on Renewable Energy Storage 2011, EuroSolar e.V., Berlin, Germany, 28./29.11.2011

Smolinka, T.; Garche, J. (NOW GmbH, Berlin, Germany)

»Stand und Entwicklungspotenzial der Wasserelektrolyse zur Herstellung von Wasserstoff aus regenerativen Energien«, NOW-Workshop Elektrolyse, NOW GmbH, Berlin, Germany, 9.5.2011

Smolinka, T.; Rau, S.; Ojong, E. T.; Hebling, C.

»Cell and Stack Design for High Pressure Operation of PEM Water Electrolyzers«, Hydrogen + Fuel Cells 2011, Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association, Vancouver, Canada, 15.–18.5.2011

Stryi-Hipp, G.

»Solar Thermal Technology for Heating and Cooling: Market Perspectives and Research Topics – Flat Plate Collectors – Principles for Design«, Energy Workshop 2011, US Army, Las Vegas, NV, USA, 28.1.2011

Thaidigsmann, B.; Lohmüller, E.; Spribille, A.; Linse, M.; Mack, S.; Jäger, U.; Pospischil, M.; Eitner, U.; Haunschild, J.; Wolf, A.; Clement, F.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.

»MWT Cell Structures for High Efficiency and Low Cost«, MWT Workshop 2011, Freiburg, Germany, 10.11.2011

Vetter, M.

»Dezentrale netzgekoppelte PV-Batteriesysteme«, Elektrische Energiespeicher 2011, VDI, Wiesbaden, Germany, 18./19.5.2011

Weber, E.

»Aussicht der PV in Deutschland und global«, OTTI Regensburg, Kloster Banz, Bad Staffelstein, Germany, 2.3.2011

Weber, E.

»Chancen und Herausforderungen der Solarindustrie nach Fukushima«, 3. Deutsch-Amerikanische Energietage Berlin, Berlin, Germany, 13.5.2011

Weber, E.

»Die Transformation auf ein 100% regeneratives Energiesystem«, Universität Konstanz, 8. Konstanzer Europakolloquium, Konstanz, Germany, 14.5.2011

Weber, E.

»Game Changer: Future Solar Cells based on Low Cost Silicon«, European Future Energy Forum EFEF 2011, Genf, Switzerland, 10.10.2011

Weber, E.

»Nanostructured Systems for Photovoltaic Applications«, International Nano-Optoelectronics Workshop iNOW Conference, Würzburg, Germany, 4.8.2011

Weber, E.

»New Materials for Low-Cost and High-Efficiency PV«, PV Asia Pacific Conference 2011, Singapur, Singapore, 3.11.2011

Weber, E.

»Perspectives for Photovoltaics«, Intersolar Europe 2011, München, Germany, 9.6.2011

Weber, E.

»Progress in Materials for Solar Energy Conversion«, American Physical Society APS, Dallas, TX, USA 21.3.2011

Weber, E.

»R&D for Renewable Energies«, Deutsch-koreanische Konferenz, Seoul, Korea, 5.10.2011

Weber, E.

»The Role of Material Science for Future Photovoltaics«, German Polish Conference on Crystal Growth GPCCG 2011, Frankfurt/Oder, Germany, 14.3.2011

Weber, E.

»Zukunft der Photovoltaik«, 6. Deutscher Energiekongress, München, Germany, 13.9.2011

Wiesenfarth, M.; Eltermann, F.; Helmers, H.; Steiner, M.; Röder, K.; Dörsam, T.; Siefer, G.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Co-Generation of Electrical Power and Thermal Energy in CPV Systems«, Spring Conference 2011, EMRS, Nizza, France, 10.5.2011

Wiesenfarth, M.; Jaus, J.; Siefer, G.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Thermisches Management in der Konzentrationphotovoltaik«, 5. Tagung Elektronikkühlung 2011, Haus der Technik, Stuttgart, Germany, 24.5.2011

VERANSTALTUNGEN 2012

PV Rollout

2nd European American Solar Deployment Conference
Boston, MA, USA, 9./10.2.2012

27. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI)
Kloster Banz, Bad Staffelstein, 29.2.–2.3.2012

Battery Expo

Tokyo, Japan, 29.2.–2.3.2012

Energy Storage

International Summit for the Storage of
Renewable Energies
Düsseldorf, 13./14.3.2012

SiliconPV

2nd International Conference on Silicon Photovoltaics
Leuven, Belgien, 3.–5.4.2012

CPV-8

8th International Conference on Concentrating
Photovoltaic Systems
Toledo, Spanien, 16.–18.4.2012

HANNOVER MESSE

Hannover, 23.–27.4.2012

22. Symposium Thermische Solarenergie (OTTI)

Kloster Banz, Bad Staffelstein, 9.–11.5.2012

World Hydrogen Energy Conference

Toronto, ON, Kanada, 3.–7.6.2012

Woche der Umwelt

Berlin, 5./6.6.2012

Intersolar Europe

München, 13.–15.6.2012

1st International Conference on Solar Heating
and Cooling for Buildings and Industry
San Francisco, CA, USA, 9.–11.7.2012

Intersolar North America

San Francisco, CA, USA, 10.–12.7.2012

Clean Tech Media Award

Berlin, 7.9.2012

18th SolarPACES Conference

Marrakesh, Marokko, 11.–14.9.2012

f-cell Forum

Stuttgart, 24./25.9.2012

27th European Photovoltaic Solar Energy
Conference and Exhibition
Frankfurt, 24.–28.9.2012

Solar Summit Freiburg

Freiburg, 18./19.10.2012

The Battery Show

Novi, Detroit, MI, USA, 13.–15.11.2012

MITARBEIT IN GREMIEN

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, Mitglied

Alliance for Rural Electrification, Mitglied

Arbeitskreis Energie der Deutschen Physikalischen Gesellschaft, 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*
- *Fachgruppe »Netzfragen«, Mitglied*

CAN in Automation (CiA), Mitglied

CPV-Consortium, Board of Directors, Mitglied

Desertec Industrial Initiative (Dii), Assoziierter Partner

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 Kalibrierdienst DKD

- *Fachausschuss Hochfrequenz und Optik, Mitglied*

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

Deutscher Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verband e. V. (DWV), 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*

Energy Conservation in Buildings and Community Systems Programme ECBCS

- *Annex 47 »Cost Effective Commissioning«*

Energy Conservation Through Energy Storage Programme ECES

- *Annex 24 »Compact Thermal Energy Storage – Material Development for System Integration«*

Erfahrungsaustauschkreis der Prüfstellen Thermischer Solaranlagen und ihrer Bauteile EKTSuB des DIN, stellv. Obmann

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 TC 169 WG 11 »Daylighting in Buildings«, Mitglied*
- *CEN TC312 WG1, WG2, WG3, Mitglied*

Energy Efficient Building Association (EEBA), Mitglied

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

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

European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC)

- *TC 82 IWG 0 1 »Wafers, Cells and Modules« – NWIP »BIPV«, Vorsitz und Mitglied*

European H2/FC Technology Platform, Mitglied

MITARBEIT IN GREMIEN

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 Electricity Association (ESTELA), Scientific Technical Committee, Mitglied

European Solar Thermal Industry Federation (ESTIF), Mitglied

European Technology Platform on Renewable Heating and Cooling (RHC-platform), Präsident

Fachinstitut Gebäude-Klima (FGK), Mitglied

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 (FVAO), 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 Glass
- TC10 »Optical Properties and Characterization of Glass«, Mitglied

International Commission on Illumination CIE
- TC 3-39 »Discomfort Glare from Daylight in Buildings«, Mitglied
- TC 3-47 »Climate-Based Daylight Modelling«, Mitglied

International Electrotechnical Commission IEC
- TC82 »Solar Photovoltaic Energy Systems«, WG3 + WG7, Mitglied
- TC105 »Fuel Cell Technologies«, WG 7/WG 11, Mitglied

International Energy Agency IEA, Mitarbeit

Heat Pump Programme HPP

- Annex 32 »Economical Heating and Cooling Systems for Low Energy Houses«
- Annex 34 »Thermally Driven Heat Pumps for Heating and Cooling«

Photovoltaic Power Systems Program (PVPS)

- Task 11 »PV Hybrid Systems within Mini-grids«

Solar Heating & Cooling Programme SHC

- Task 37 »Advanced Housing Renovation with Solar and Conservation«
- Task 38 »Solar Air-Conditioning and Refrigeration«
- Task 39 »Polymeric Materials for Solar Thermal Applications«
- Task 43 »Solar Rating and Certification Procedure – Advanced Solar Thermal Testing and Characterization for Certification of Collectors and Systems
- Task 44 »Solar and Heat Pump Systems – Systems Using Solar Thermal Energy in Combination with Heat Pumps«
- Task 48 »Quality Assurance and Support Measures for Solar Cooling«
- Task 49 »Solar Process Heat for Production and Advanced Applications«

International Programme Committee of GADEST, Mitglied

International Science Panel on Renewable Energies (ISPRE), Vorsitz

International Standardization Organization ISO

- TC180 Solar Energy, WG 2, WG 5, Mitglied

Intersolar North America, Programme Committee, Vorsitz

Kompetenzfeld Photovoltaik NRW, Mitglied

Kompetenznetzwerk Brennstoffzelle NRW, Mitglied

Leibniz-Institut für Kristallzüchtung IKZ, Beirat

Lichttechnische Gesellschaft, Mitglied

Mikrosystemtechnik Baden-Württemberg (MST-BW), Beirat

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

Scientific Commission to the ENI Science and Technology Award, Mitglied

Solar Keymark Network, Mitglied

Solar Power and Chemical Energy Systems SOLARPACES

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

SEMI International, Board of Directors, Mitglied

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

Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS), Beirat

Stiftung Solarenergie, Beirat

Symposium Photovoltaische Solarenergie, OTTI Technologie-Kolleg, Wissenschaftlicher Beirat

Symposium Thermische Solarenergie, OTTI Technologie-Kolleg, Wissenschaftlicher Beirat

User Forum »ThinFilmPhotovoltaics«, Wissenschaftlicher Beirat

VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung

- Richtlinienausschuss 4706 »Kriterien für das Innenraumklima«
- Richtlinienausschuss 4650, Blatt 1 und Blatt 2 »Wärmepumpen«
- Richtlinienausschuss 4645, »Planung und Dimensionierung von Wärmepumpen von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern«
- Richtlinienausschuss 2164 »Latentspeichersysteme«

VDMA – The German Engineering Federation

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

MESSEN

VDMA Brennstoffzellen

- Arbeitskreis »Industrienetze«, Mitglied
- Arbeitskreis »Industriepolitik«, Mitglied

Verband der Materialprüfämter e. V. (VMPA)

- Sektorgruppe »Türen, Fenster und Glasprodukte«, Mitglied

Verband zu Energieeffizienz in Gebäuden, Gründungsmitglied

Verein Deutscher Ingenieure (VDI)

VDI-Gesellschaft Energietechnik

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

Weiterbildungszentrum WBZU »Brennstoffzelle«, Mitglied im Aufsichtsrat

Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung ZSW, Kuratorium

BAU

München, 17.–22.1.2011

*7th International Hydrogen & Fuel Cell Expo, FC Expo
Tokyo, Japan, 2.–4.3.2011*

*26. Symposium Photovoltaische Solarenergie
Kloster Banz, Bad Staffelstein, 2.–4.3.2011*

Battery Expo Japan

Tokyo, Japan, 2.–4.3.2011

Hannover Messe

Hannover, 4.–8.4.2011

*21. Symposium Thermische Solarenergie (OTTI)
Kloster Banz, Bad Staffelstein, 11.–13.5.2011*

Intersolar Europe

München, 8.–10.6.2011

*Intersolar/Sonderschau PV Energy World
München, 8.–10.6.2011*

Intersolar North America

San Francisco, CA, USA, 12.–14.7.2011

*26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition
Hamburg, 5.–8.9.2011*

CLEAN TECH MEDIA AWARD

Hamburg, 16.9.2011

f-cell Forum

Stuttgart, 26./27.9.2011

Les Rendez-Vous CARNOT

Lyon, Frankreich, 12./13.10.2011

*UrbanTec – Smart Technologies for Better Cities
Köln, 24.–26.10.2011*

Intersolar Indien

Mumbai, Indien, 14.–17.12.2011

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Andreas, W.; Christoph, B.; Sebastian, M.; Marc, H.; Pierre, S.-C.; Daniel, B.

»Impact of Thin Intermediate Thermal Oxide Films on the Properties of PECVD Passivation Layer Systems«, in: Proceedings, 37th IEEE PVSC 2011, Seattle, WA, USA, 19.–24.6.2011

Baur, C. (European Science and Technology Centre, Noordwijk, The Netherlands); Siefer, G.; Kern, R.; Winter, S. (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig, Germany)

»Primary Solar Cell Standards – Comparison of Extraterrestrial Synthetic Calibration«, in: Proceedings, 9th European Space Power Conference 2011, Saint-Raphael, France, 6.–10.6.2011

Benoit, P.; Bloch, A.; Kohrs, R.; Wittwer, C.

»Charge Application Protocol for Different Bidirectional Integration Topologies«, in: Proceedings, Smart Grids and E-Mobility 2011, Munich, Germany, 17./18.10.2011, CD-ROM

Bett, A. W.

»III-V Multi-Junction Solar Cells and Concentrating Optics – A Perfect Match for Highest Efficiencies«, in: Photonics in Germany

Binder, S.; Bartsch, J.; Glatthaar, M.; Glunz, S.

»Printed Contact on Emitter with Low Dopant Surface Concentration«, in: Proceedings, 3rd Workshop on Metallization for Crystalline Silicon Solar Cells 2011, Charleroi, Belgium, 25.11.2011

Birmann, K.; Demant, M.; Rein, S.

»Optical Characterization of Random Pyramid Texturization«, in: Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011

Birmann, K.; Zimmer, M.; Rentsch, J.

»Fortschrittliche Verfahren zur alkalischen Textur von kristallinem Silicium«, Freiburger Siliziumtage 2011, Freiberg, Germany, 15.–17.7.2011, CD-ROM

Biro, D.; Thaidigsmann, B.; Clement, F.; Wolf, A.; Lohmüller, E.;

Mack, S.; Fellmeth, T.; Drews, A.; Spribille, A.; Wotke, E. A.;

Lottspeich, F.; Lottspeich, F.; Hofmann, M.; Jäger, U.; Preu, R.

»MWT Meets PERC: Towards 20% Efficient Industrial Silicon Solar Cells«, in: Proceedings, 37th IEEE PVSC 2011, Seattle, WA, USA, 19.–24.6.2011, CD-ROM

Bivour, M.; Rüdiger, M.; Reichel, C.; Ritzau, K.-U.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Analysis of the Diffused Front Surface Field of n-type Silicon Solar Cells with a-Si/c-Si Heterojunction Rear Emitter«, in: Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011, pp. 185-192

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.122>)

Bläsi, B.; Hauser, H.; Höhn, O.; Kübler, V.; Peters, M.; Wolf, A. J.

»Photon Management Structures Originated by Interference Lithography«, in: Proceedings, Silicon PV, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.206>)

Bläsi, B.; Hauser, H.; Walk, C.; Michel, B.; Mellor, A.; Guttowski, A.;

Jüchter, S.; Wellens, C.; Peters, M.; Kübler, V.; Wolf, A. J.

»Photon Management Structures Based on Interference Lithography and Nanoimprint Processes«, in: Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011

Bläsi, B.; Hauser, H.; Walk, C.; Michl, B.; Kübler, V.; Wolf, A. J.

»Photon Management Structures Based on Interference Lithography«, in: Future Photovoltaics

Bongs, C.; Morgenstern, A.; Lukito, Y.; Henning, H.-M.

»Performance Analysis and Model Validation of an Evaporatively Cooled Sorptive Heat Exchanger (ECOS)«, in: Proceedings, 4th International Conference Solar Air-Conditioning 2011, Larnaka, Cyprus, 12.–14.10.2011, CD-ROM

Bongs, C.; Wahed, M. A. (SERIS, Singapore, Singapore); Luther, J.

(SERIS, Singapore, Singapore); Henning, H.-M.; Morgenstern, A.

»Solar Thermal Driven Air-Conditioning System for Singapore Climate«, in: Proceedings, Solar Air-Conditioning 2011, Larnaka, Cyprus, 12.–14.10.2011, CD-ROM

Bopp, G.; Pfanner, N.

»Solar Red Lights – Investigations and Tests«, in: Proceedings, Small PV Applications 2011, Ulm, Germany, 6./7.6.2011, CD-ROM

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Breitenstein, L.; Richter, A.; Hermle, M.; Warta, W.

»Impact of Wet-Chemical Cleaning on the Passivation Quality of Al_2O_3 Layers«, in: *Proceedings, 37th IEEE PVSC 2011, Seattle, WA, USA, 19.–24.6.2011*

Breitenstein, L.; Richter, A.; Hermle, M.; Warta, W.

»Studies on Wet-Chemical Surface Conditioning for Al_2O_3 Passivation Layers Deposited with ALD«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Burger, B.; Goeldi, B.; Reichert, S.

»Hoch effizientes und kompaktes bidirektionales Ladegerät für die Elektromobilität«, in: *Proceedings, ETG-Kongress – Leistungselektronik in Netzen 2011, Würzburg, Germany, 8./9.11.2011, CD-ROM*

Burhenne, S.

»Energieeffiziente Gebäude«, Lehrgang »Energie Manager16001« 2011, Malterdingen, Germany, 20.10.2011

Burhenne, S.

»Nutzer-Seminar – »Solarenergie««, Gebäude. Energie. Technik 2011, Freiburg, Germany, 26.2.2011

Burhenne, S.; Jacob, D.; Henze, G. P. (University of Colorado, Boulder, CO, USA)

»Sampling Based on Sobol' Sequences for Monte Carlo Techniques Applied to Building Simulations«, in: *Proceedings, Building Simulation 2011, IBPSA, Sydney, Australia, 14.–16.11.2011, CD-ROM*

Burhenne, S.; Radon, J. (University of Cracow, Cracow, Poland);

Pazold, M. (Fraunhofer IBP, Stuttgart, Germany); Herkel, S.;

Antretter, F. (Fraunhofer IBP, Stuttgart, Germany)

»Integration of HVAC Models into a Hygrothermal Whole Building Simulation Tool«, in: *Proceedings, Building Simulation 2011, IBPSA, Sydney, Australia, 14.–16.11.2011, CD-ROM*

Cipollina, J. (Università degli Studi di Palermo, Palermo, Italy);

Koschikowski, J.; Pfeiffle, D.; Rolletschek, M.; Schwantes, R.; Groß, F.

»Membrane Distillation: Solar and Waste Heat Driven Demonstration Plants for Desalination«, in: *Proceedings, International Conference on Membrane Distillation and Related Technologies 2011, Ravello, Italy, 9.–12.10.2011, CD-ROM*

Clement, C.; Seiffe, J.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.; Naumann, V. (Fraunhofer CSP, Halle, Germany); Werner, M. (Fraunhofer CSP, Halle, Germany)

»Interface Characterization of Dry-Etched Emitters«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Clement, F.; Thaidigsmann, B.; Hoenig, R.; Fellmeth, T.;

Spribile, A.; Lohmüller, E.; Krieg, A.; Glatthaar, M.; Wirth, H.;

Biro, D.; Preu, R.; Menkoe, M. (Bosch Solar Energy AG,

Erfurt, Germany); Meyer, K. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt,

Germany); Lahmer, D. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany);

Krokoszinski, H.-J. (Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany);

Neidert, M. (W. C. Heraeus GmbH, Hanau, Germany); Henning, A.

(W. C. Heraeus GmbH, Hanau, Germany); Mohr, C. (W. C. Heraeus

GmbH, Hanau, Germany); Zhang, W. (W. C. Heraeus GmbH, Hanau,

Germany)

»Processing of Highly-Efficient MWT Silicon Solar Cells«, in: *Photovoltaic Production Annual*

Clement, F.; Thaidigsmann, B.; Lohmüller, E.; Specht, J.; Jäger, U.;

Mack, S.; Pospischil, M.; Spribile, A.; Erath, D.; Nekarda, J.;

Hofmann, M.; Wolf, A.; Biro, D.; Preu, R.

»Paths to Achieve Efficiencies over 20% with MWT Silicon Solar

Cells«, in: *Proceedings, 21st PVSEC 2011, Fukuoka, Japan,*

28.11.–2.12.2011

Demant, M.; Rein, S.; Krisch, J.; Schoenfelder, S. (Fraunhofer IWM,

Halle, Germany); Preu, R.; Fischer, C. (Fraunhofer IWM, Halle,

Germany); Bartsch, J. (Jonas & Redmann Photovoltaics Production Solutions GmbH, Berlin, Germany)

»Detection and Analysis of Micro-Cracks in Multi-Crystalline Silicon

Wafers During Solar Cell Production«, in: *Proceedings, 37th IEEE PVSC*

2011, Seattle, WA, USA, 19.–24.6.2011

Dennenmoser, M.; Bromberger, K.; Obwald, F.; Korring, K.;

Schwind, T.; Smolinka, T.; Vetter, M.

»Design, Characterisation and Operation Strategies of 1 KW

All-Vanadium Redox Flow Battery«, in: *Proceedings, The Second*

International Flow Battery Forum 2011, Edinburgh, UK, 4.5.2011

- Dötter, G.; Burger, B.; Loos, F.; Rogalla, S.; Schönberger, S.
 »Mittelspannungsrichtlinie: Reifeprüfung für Solarwechselrichter, Medium Voltage Grid Codes: Testing of Photovoltaic Inverters«, in: *Proceedings, Leistungselektronik in Netzen 2011, Würzburg, Germany, 8./9.11.2011, CD-ROM*
- Drießen, M.; Merkel, B.; Reber, S.
 »Advanced APCVD-Processes for High-Temperature Grown Crystalline Silicon Thin Film Solar Cells«, in: *Journal of Nanoscience and Nanotechnology, EuroCVD 18 2011, Kinsale, Ireland, 5.–9.9.2011*
- Dupeyrat, P.; Ménézo, C. (Université de Savoie, Lyon, France); Bai, Y. (Université de Savoie, Lyon, France/City University of Hong Kong, China); Fortuin, S.; Kwiatkowski, G. (EDF R&D – EnerBAT, Moret sur Loing, France); Rommel, M. (University of Bern, Rapperswil, Switzerland); Stryi-Hipp, G.
 »Hybrid Photovoltaic-Thermal (PV-T) Solar Co-Generation at the Building's Scale«, in: *Proceedings, CISBAT 2011, Lausanne, Switzerland, 14.–16.9.2011, CD-ROM*
- Eberlein, D.; Schmitt, P.; Voss, P. (Buehler GmbH, Düsseldorf, Germany); Wagner, R. (Buehler GmbH, Düsseldorf, Germany)
 »Solar Cell Microstructural Analysis«, in: *Buehler Tech-Notes 5 (2011), No. 6*
- Eisenlohr, J.; Benick, J.; Peters, M.; Höhn, O.; Janz, S.; Goldschmidt, J. C.; Bläsi, B.; Hermle, M.; Glunz, S. W.
 »Nanostructured Back Side Reflectors for Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*
- Eltermann, F.; Wiesenfarth, M.; Siefer, G.; Wilde, J. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Bett, A. W.
 »The Effects of Accelerated Aging Tests on Metamorphic III-V Concentrator Cells Mounted on Substrates«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*
- Essig, S.; Welser, E.; Rönsch, S.; Oliva, E.; Schachtner, M.; Siefer, G.; Bett, A. W.; Dimroth, F.
 »Dilute Nitrides for 4- and 6-Junction Space Solar Cells«, in: *Proceedings, 9th European Space Power Conference 2011, Saint-Raphael, France, 6.–10.6.2011*
- Fahr, S.; Kramer, K.; Mehnert, S.; Richter, J.; Thoma, C.; Schmidt, C.; Schäfer, A.; Geimer, K.; Kuhn, T.; Ruschenburg, J.
 »Testing Methods for Innovative Collectors and Systems«, in: *Proceedings, Solar World Congress 2011, Kassel, Germany, 28.8.–2.9.2011, CD-ROM*
- Fallisch, A.; Werner, S.; Retzlaff, M.; Neubauer, R.; Lottspeich, F.; Biro, D.
 »18.7% Emitter Wrap-Through Silicon Solar Cells with Screen-Printed Silver Contacts Acting as a Barrier for Evaporated Aluminium Metallization«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*
- Fath, K.; Kuhn, T.
 »TCO-Analyse der Wirtschaftlichkeit von PV und GIVP-Anlagen: Entwicklung einer Methodik und Ergebnisse ihrer Anwendung«, in: *Proceedings, PV SKIN – Industrieforum für Gebäudeintegrierte Photovoltaik, Salzburg, Austria, 24.–26.11.2011, CD-ROM*
- Fellmeth, T.; Born, A.; Kimmerle, A.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.
 »Recombination at Metal-Emitter Interfaces of Front Contact Technologies for Highly Efficient Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011, pp. 115–121*
 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.111>)
- Fellmeth, T.; Drews, A.; Thaidigsmann, B.; Mack, S.; Wolf, A.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.
 »Industrially Feasible All Side Passivated Silicon Based C-MWT Concentrator Solar Cells«, in: *Proceedings, 37th IEEE PVSC 2011, Seattle, WA, USA, 19.–24.6.2011, CD-ROM*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Ferrando, E. (Selex Galileo, Nerviano, Italy); Croci, L. (Selex Galileo, Nerviano, Italy); Damonte, G. (Selex Galileo, Nerviano, Italy); Hazan, D. (Selex Galileo, Nerviano, Italy); Riva, S. (Selex Galileo, Nerviano, Italy); Romani, R. (Selex Galileo, Nerviano, Italy); Casaregola, C. (ALTA S.p.A., Pisa, Italy); Brambilla, A. (Politecnico di Milano, Milano, Italy); Gruosso, G. (Politecnico di Milano, Milano, Italy); Storti Gajani, G. (Politecnico di Milano, Milano, Italy); Blott, R. (Space Enterprise Partnerships, West Sussex, UK); Battocchio, L. (AERO SEKUR S.p.A., Aprilia, Italy); Steiner, M.; Tuissi, A. (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per l' Energetica e le Interfasi, Lecco, Italy); Casati, R. (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per l' Energetica e le Interfasi, Lecco, Italy); Chiarelli, M. (Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, Pisa, Italy)
»Study Results on a Solar Electric Power System for High Power Electric Propulsion (Hiper) Applications«, in: Proceedings, 62nd STUDY RESULTS International Astronautical 2011, Cape Town, South Africa, 3.–10.10.2011
- Fertig, F.; Rein, S.; Schubert, M.; Warta, W.
»Impact of Junction Breakdown in Multi-Crystalline Silicon Solar Cells on Hot Spot Formation and Module Performance«, in: Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011
- Fluri, T.; Cuevas, F.; Pidaparathi, P.; Platzer, W.
»Assessment of the Potential for Concentrating Solar Power in Northern Chile«, in: Proceedings, Solar Paces 2011, Granada, Spain, 20.–23.9.2011
- Frey, M.; Erath, D.; Clement, F.; Biro, D.; Dilfer, S. (TU Darmstadt, Darmstadt, Germany)
»Frontside Metallization by Means of Flexographic Printing«, in: Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011
- Frontini, F.; Sprenger, W.; Kuhn, T.
»Eine neue winkelselektiv-teiltransparente BIPV-Fassadenkonstruktion«, in: Proceedings, Forum Gebäudeintegrierte Photovoltaik 2011, Bad Staffelstein, Germany, 1.12.3.2011, CD-ROM
- Füldner, G.; Henning, H.-M.; Schossig, P.; Schmidt, F.
»General Considerations on Thermal Energy Storage with Closed Adsorption Systems«, in: Proceedings, International Conference on Sustainable Energy Storage 2011, Belfast, UK, 21.–24.2.2011, CD-ROM
- Füldner, G.; Schnabel, L.; Wittstadt, U.; Henning, H.-M.; Schmidt, F. (Karlsruhe Institute of Technology, Karlsruhe, Germany)
»Numerical Layer Optimization of Alumin Fibre/ Sap0-34 Composites for the Application in Adsorptive Heat Exchangers«, in: Proceedings, International Sorption Heat Pump Conference 2011, Padua, Italy, 6.–8.4.2011, CD-ROM
- Gerteisen, D.; Mérida, W. (University of British Columbia, Vancouver, Canada); Kurz, T.; Schwager, M.; Spadinger, A.; Alink, R.; Hebling, C.
»Voltage, Current and Electrochemical Impedance Spectroscopy Measurements on a 7 x 7 Segmented Fuel Cell«, Hydrogen + Fuel Cells 2011, Vancouver, Canada, 15.–18.5.2011
- Gerteisen, D.; Spadinger, A.; Schwager, M.; Mérida, W. (University of British Columbia, Vancouver, Canada); Hebling, C.
»Spatially Resolved Analysis of Water Transport Mechanisms«, in: Proceedings, European Fuel Cell Forum 2011, Lucerne, Switzerland, 28.6–1.7.2011
- Giesecke, J. A.; Michl, B.; Schindler, F.; Schubert, M. C.; Warta, W.
»Spatially Resolved Carrier Lifetime Calibrated via Quasi-Steady-State Photoluminescence«, in: Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011, pp. 64-70
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.103>)
- Granek, F.
»Selective Emitter for High-Efficiency Silicon Solar Cells Using Laser Chemical Processing«, in: Proceedings, 2nd Polish Conference on Photovoltaics 2011, Krynica Zorój, Poland, 12.–15.5.2011
- Granek, F.; Hopman, S.; Kluska, S.; Fell, A.; Breitwieser, M.; Fleischmann, C.; Glunz, S. W.
»Progress in Laser Chemical Processing for Silicon Solar Cells«, in: Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011

Granek, F.; Hopman, S.; Kluska, S.; Breitwischer, M.; Fleischmann, C.; Glatthaar, M.; Glunz, S.

»Recent Developments in Laser Chemical Processing (LCP) for Silicon Solar Cells«, in: *Future Photovoltaics* 6 (2011), No. 6

Greulich, J.; Glatthaar, M.; Fertig, F.; Clement, F.; Thaidigsmann, B.; Fallisch, A.; Biro, D.; Rüdiger, M.; Hermle, M.; Rein, S.

»Intrinsic Effects of Double Side Collecting Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011*, pp. 160-166
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.118>)

Gundel, P.; Drießen, M.; Bartsch, J.; Jäger, U.; Suwito, D.; Heinz, F. D.; Warta, W.; Schubert, M. C.

»Comprehensive Characterization of Advanced Cell Concepts with Sub-Micron Resolution«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011*, pp. 250-256
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.132>)

Günther, D.; Miara, M.

»Effizienz von Wärmepumpensystemen unter realen Nutzungsbedingungen/ Einfluss der Speicherkonzepte«, in: *Moderne Gebäudetechnik*

Gutmann, J.; Peters, M.; Bläsi, B.; Hermle, M.; Zappe, H. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Goldschmidt, J. C.

»Towards Photonic Luminescent Solar Concentrators«, in: *Proceedings, SPIE Optics and Photonics 2011, San Diego, CA, USA, 21.–25.8.2011*

Hahnel, U. J.; Gölz, S.; Spada, H. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany)

»Introducing Human Factors Psychology to Vehicle-to-Grid Technologies«, in: *Proceedings, Smart Grids and E-Mobility 2011, Munich, Germany, 17./18.10.2011, CD-ROM*

Hahnel, U.; Gölz, S.; Spada, H. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany)

»How Accurate are Drivers' Predictions on their Own Mobility? Accounting for Psychological Factors in the Development of Modern Technology for Electrical Vehicles«, in: *Special Issue »Psychology of Sustainable Mobility«*

Hahnel, U.; Gölz, S.; Spada, H. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany)

»Kann der Nutzer den Anforderungen intelligenter Lademanagementkonzepte für Elektrofahrzeuge gerecht werden?«, in: *Proceedings, 7. Tagung der Fachgruppe AOW der DGPs 2011, Rostock, Germany, 7.–9.9.2011, CD-ROM*

Hauser, H.; Bläsi, B.

»Strukturierte Oberflächen für ein Photonenmanagement in der Photovoltaik«, in: *Inno IVAM 16 (2011), No. 48*

Hauser, H.; Michl, B.; Kübler, V.; Schwarzkopf, S.; Hermle, M.; Bläsi, B.

»Nanoimprint Lithography for Honeycomb Texturing of Multicrystalline Silicon«, in: *Proceedings, Silicon PV 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011*
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.196>)

Helmers, H.; Boos, A.; Jetter, F.; Striewe, W.; Wiesenfarth, M.; Kramer, K.; Bett, A. W.

»CPVT-Freilandteststand zur Untersuchung der Ko-Generation von Wärme und elektrischer Energie mittels hochkonzentrierter Solarstrahlung«, in: *Proceedings, 21. Symposium Thermische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein, Germany, 11.–13.5.2011*

Henning, H.-M.

»Feature Article – Solar Air-Conditioning and Refrigeration«, in: *IEA Solar Heating & Cooling Programme 2010 Annual Report*

Henning, H.-M.

»Solar Air-Conditioning – Status and Perspectives«, *3rd International Conference on Renewable Energy Sources & Energy Efficiency 2011, Nicosia, Cyprus, 19./20.5.2011*

Henning, H.-M.

»Solar Energy for Cooling and Refrigeration: Status and Perspectives«, in: *Proceedings, Solar World Congress 2011, Kassel, Germany, 28.8.–1.9.2011*

Henning, H.-M.; Schossig, P.

»Latente Wärme für Gebäude: Perspektiven für Speichersysteme mit Phase Change Materials«, in: *Proceedings, Gebäude der Zukunft 2011, Munich, Germany, 18.1.2011*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Henning, H.-M.; Schossig, P.; Nuñez, T.; Wiemken, E.

»Heizen und Kühlen mit Solarenergie – Lösungsansätze auf Basis thermischer und elektrischer Verfahren«, in: *Proceedings, 21. Symposium Thermische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein, Germany, 11.–13.5.2011, CD-ROM*

Henninger, S.; Freni, A. (Consiglio Nazionale delle Ricerche, Messina, Italy); Schnabel, L.; Restuccia, G. (Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia, Messina, Italy)

»Unified Water Adsorption Measurement Procedure for Sorption Materials«, in: *Proceedings, International Sorption Heat Pump Conference 2011, Padua, Italy, 6.–8.4.2011, CD-ROM*

Henninger, S.; Jeremias, F.; Ehrenmann, J. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Janiak, C. (Universität Düsseldorf, Düsseldorf, Germany)

»The Potential of PCPs/MOFs for the Use in Adsorption Heat Pump Processes«, in: *Proceedings, International Heat Pump Conference 2011, Padua, Italy, 6.–8.4.2011, CD-ROM*

Henninger, S.; Schossig, P.; Henning, H.-M.

»Novel Sorption Materials for Heat Storage – Potential and Limits«, in: *Proceedings, International Renewable Energy Storage Conference 2011, Berlin, Germany, 22.–24.11.2011, CD-ROM*

Hermann, M.; Koch, L.; di Lauro, P.; Bauch, M.

»New Absorber Manufacturing and Materials – Challenges for Absorber Design and Evaluation«, in: *Proceedings, Solar World Congress 2011, Kassel, Germany, 28.8.–2.9.2011, CD-ROM*

Hermann, M.; Thoma, C.; Koch, L.; Dupeyrat, P.

»Der FracTherm-Kollektor – erste Messergebnisse von Prototypen«, in: *Proceedings, 21. Symposium Thermische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein, Germany, 11.–13.5.2011, CD-ROM*

Hermle, M.; Benick, J.; Rüdiger, M.; Bateman, N.; Glunz, S.W.

»n-Type Silicon Solar Cells with Implanted Emitter«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Herter, B.; Peters, M.; Janz, S.; Hermle, M.; Goldschmidt, J. C.

»One-Dimensional SiC Photonic Structures to Enhance the Efficiency of Systems with Silicon Solar Cells and Upconverters«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Hess, S.

»Designing Solar Thermal Systems for Selected Industrial Applications«, in: *Proceedings, World Sustainable Energy Days – Solar Process Heat 2011, Wels, Austria, 2.–4.3.2011, CD-ROM*

Hess, S.; Klemke, M.; Oliva, A.; Di Lauro, P.; Hermann, M.;

Stryi-Hipp, G.; Kramp, G. (Wagner & Co. Solartechnik GmbH, Cölbe, Germany); von Bodungen, O. (Wagner & Co. Solartechnik GmbH, Cölbe, Germany); Eisenmann, W. (Wagner & Co. Solartechnik GmbH, Cölbe, Germany)

»Pilotanlage mit RefleC-Kollektoren: Anlagenkonzept und Monitoring-Ergebnisse«, in: *Proceedings, 21. Symposium Thermische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein, Germany, 11.–13.5.2011, CD-ROM*

Heß, S.; Oliva, A.; Stryi-Hipp, G.; Hanby, V.

»Solar Process Heat – System Design for Selected Low-Temperature Applications in the Industry«, in: *Proceedings, Solar World Congress 2011, Kassel, Germany, 28.8.–1.9.2011*

Hinsch, A.; Veurman, W.; Brandt, H.; Loayza Aguirre, R.; Bialecka, K.; Flarup Jensen, K.

»Worldwide First Fully Up-Scaled Fabrication of 60 cm x 100 cm Dye Solar Module Prototypes«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Hoheisel, R.; Rönsch, S.; Dimroth, F.; Bett, A. W.; Nesswetter, H.; Zimmermann, C. G.

»Electroluminescence Exposes Individual Performances in Multi-Junction Cells«, in: *Compound Semiconductors (2011)*, pp. 28–31

Hollinger, R.; Büttner, M.; Erge, T.; Wille-Hausmann, B.; Wittwer, C.

»Mikro-BHKW zur Eigenversorgung in der Wohnungswirtschaft: Wirtschaftlichkeit und Systemintegration«, in: *Proceedings, Internationaler ETG Kongress 2011, Würzburg, Germany, 8./9.11.2011, CD-ROM*

Hönig, R.; Glatthaar, M.; Clement, F.; Greulich, J.; Wilde, J. (RENA GmbH, Gütenbach, Germany); Biro, D.

»New Measurement Method for the Investigation of Space Charge Region Recombination Losses Induced by the Metallization of Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011*, pp. 694-699 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.203>)

Hornung, T.; Neubauer, M. (Concentrix Solar GmbH, Freiburg, Germany); Gombert, A. (Concentrix Solar GmbH, Freiburg, Germany); Nitz, P.

»Fresnel Lens Concentrator with Improved Thermal Behavior«, in: *Proceedings, CPV-7 2011, Las Vegas, NV, USA, 4.–6.4.2011*, CD-ROM

Hornung, T.; Nitz, P.

»Analytical Investigation of Diffraction in Fresnel Lens Concentrators«, in: *Proceedings, CPV-7 2011, Las Vegas, NV, USA, 4.–6.4.2011*, CD-ROM

Hornung, T.; Steiner, M.; Nitz, P.

»Estimation of the Influence of Fresnel Lens Temperature on Energy Generation of a Concentrator Photovoltaic System«, in: *Proceedings, CPV-7 2011, Las Vegas, NV, USA, 4.–6.4.2011*, CD-ROM

Hülsmann, P.; Peike, C.; Blüml, M.; Schmid, P.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.
»Impact of Permeation Properties and Back Sheet/ Encapsulation Interactions on the Reliability of PV-Modules«, in: *Proceedings, International Mechanical Engineering Congress 2011, Denver, CO, USA, 11.–17.11.2011*

Jäger, U.; Fertig, F.; Oesterlin, P. (Innovavent GmbH, Göttingen, Germany); Büchel, A. (Jenoptik Automatisierungstechnik GmbH, Jena, Germany); Ullmann, R. (Innovavent GmbH, Göttingen, Germany); Jenoptik Automatisierungstechnik GmbH Jena, Germany); Zühlke, H.-U. (Jenoptik Automatisierungstechnik GmbH, Jena, Germany); Preu, R.

»Beam Shaping for High Throughput Laser Doped Selective Emitter Solar Cells«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Jäger, U.; Thaidigsmann, B.; Okanovic, M. (MANZ Automation AG, Reutlingen, Germany); Preu, R.

»Quantum Efficiency Analysis of Highly Doped Areas for Selective Emitter Solar Cells«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011*, pp. 193-199 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.123>)

Janz, S.; Löper, P.; Schnabel, M.; Zacharias, M. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Hiller, D. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Gutsch, S. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Hartel, A. M. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Summonte, C. (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la Microelettronica e i Microsistemi, Bologna, Italy); Canino, M. (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la Microelettronica e i Microsistemi, Bologna, Italy); Allegrezza, M. (Consiglio Nazionale delle Ricerche – Istituto per la Microelettronica e i Microsistemi, Bologna, Italy); Ossicini, S. (Università di Modena e Reggio Emilia, Modena, Italy); Ossicini, S. (Università di Modena e Reggio Emilia, Modena, Italy); Guerra, R.; Marri, I. (Università di Modena e Reggio Emilia, Modena, Italy); Garrido, B. (Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain); Hernandez, S. (Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain); López-Vidrier, J. (Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain); Valenta, J. (Charles University, Prague, Czech Republic); Kubera, T. (AZUR Space Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Foti, M. (STMicroelectronics, Catania, Italy)

»The NAScEnT Project«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Jaus, J. (Black Photon Instruments GmbH, Freiburg, Germany); Mißbach, T. (Black Photon Instruments GmbH, Freiburg, Germany); Philipps, S. P.; Siefer, G.; Bett, A. W.

»Spectral Measurements Using Component Cells: Examinations on Measurement Precision«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Kalio, A.; Richter, A.; Hörteis, M.; Glunz, S. W.

»Metallization of N-Type Silicon Solar Cells Using Fine Line Printing Techniques«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011*, pp. 571-576

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.184>)

Kalz, D.; Koenigsdorff, R. (Hochschule Biberach Gebäudeklimatik und Energiesysteme, Biberach, Germany); Pfaffert, J.

»Thermoaktive Bauteilsysteme (TABS): Betriebserfahrungen aus der Praxis«, in: *DETAIL Oktober (2011)*

Kamp, M.; Bartsch, J.; Nold, S.; Retzlaff, M.; Hörteis, M.; Glunz, S. W.

»Economic Evaluation of Two-Step Metallization Processes for Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011*, pp. 558-564
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.182>)

Keding, R.; Woehl, R.; Stüwe, D.; Fallisch, A.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Biro, D.

»Diffusion and Characterization of Doped Patterns in Silicon from Prepatterned Boron- and Phosphorus-Doped Silicate Glasses«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Keipert-Colberg, S.; Barkmann, N.; Streich, C.; Schütt, A. (University of Kiel, Kiel, Germany); Suwito, D.; Schäfer, P.; Müller, S.; Borchert, D.

»Investigation of a PECVD Silicon Oxide/Silicon Nitride Passivation System Concerning Process Influences«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Keller, M.; Reber, S.; Schillinger, N.; Póczy, D.; Arnold, M.

»In-Line Silicon Epitaxy for Photovoltaics Using a Continuous CVD Deposition Reactor«, in: *Proceedings, EuroCVD 18 2011, Kinsale, Ireland, 4.–9.9.2011*

Keller, S.; Meder, Q.; Özel, T.; Sadeler, C.; Zaghoul, A.; Hebling, C.

»Using Electrochemical Impedance Spectroscopy for Fuel Cell Control«, in: *Proceedings, 15th European Fuel Cell Forum 2011, Lucerne, Switzerland, 28.6.–1.7.2011*

Keller, S.; Meder, Q.; Özel, T.; Sadeler, C.; Zaghoul, A.; Hebling, C.
»Using Electrochemical Impedance Spectroscopy for Fuel Cell Control«, in: *Proceedings, 15th European Fuel Cell Forum 2011, Lucerne, Switzerland, 28.6.–1.7.2011*

Kimmerle, A.; Wolf, A.; Biro, D.; Belledin, U.

»Modelling Carrier Recombination in Highly Phosphorus-Doped Industrial Emitters«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011*, pp. 275-281

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.136>)

Klinger, V.; Dreyer, K.; Fehrenbacher, E.; Wekkeli, A.; Oliva, E.; Köstler, W. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Strobl, G. (AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn, Germany); Dimroth, F.; Baur, C. (European Space Agency ESTEC, Noordwijk, Netherlands)

»Development of Ultra-Thin GaInP/GaAs Space Solar Cells«, in: *Proceedings, 9th European Space Power Conference 2011, Saint-Raphael, France, 6.–10.6.2011*

Klinger, V.; Wekkeli, A.; Roesener, T.; Scheer, M.; Dimroth, F.

»Development of Metamorphic Buffer Structures for Inverted Metamorphic Solar Cells«, in: *Proceedings, 37th IEEE PVSC 2011, Seattle, WA, USA, 19.–24.6.2011*

Kluska, S.; Cinkowski, M. K.; Granek, F.; Glunz, S. W.

»Boron LCP Local Back Surface Fields for High Efficiency Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 37th IEEE PVSC 2011, Seattle, WA, USA, 19.–24.6.2011*

Koch, L.; Hermann, M.; Steinbach, F. (TU Dortmund, Dortmund, Germany); Trompeter, M. (TU Dortmund, Dortmund, Germany); Tekkaya, A. E. (TU Dortmund, Dortmund, Germany)

»Entwicklung von Solarabsorbern aus Stahl auf Basis partiell plattierter Hybridhalbleitende«, in: *Proceedings, 21. Symposium Thermische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein, Germany, 11.–13.5.2011, CD-ROM*

Koch, W.; Magel, K.; Rochlitz, L.; Aicher, T.

»Bio-Ethanol Reformer with HT-PEM Fuel Cell for Residential Combined Heat and Power Generation«, in: *Proceedings, 19th European Biomass Conference & Exhibition, Berlin, Germany, 6.–10.6.2011, DVD-ROM*

Köhl, M.; Philipp, D.; Weiß, K.-A.

»Rundvergleich von UV-Prüfeinrichtung für Photovoltaik-Module«, in: *Proceedings*, 40. GUS Jahrestagung 2011, Stutensee, Germany, 30.3.–1.4.2011

Kräling, U.; Neuberger, F.; Farnung, B.; Kiefer, K.

»Präzisionsmessungen an PV-Modulen – Anforderungen an die Messtechnik und die Messprozeduren«, in: *Proceedings*, 26th Symposium Photovoltaische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein, Germany, 2.–4.3.2011

Krieg, A.; Rajsrima, N.; Rein, S.

»Laser Marking of Solar Cells: Technologies and Potential«, in: *Proceedings*, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011

Kröger-Vodde, A.; Armbruster, A.; Rössler, E.

»Vergleich der Performance von PV-Anlagen«, in: *Proceedings*, 26. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein, Germany, 2.–4.3.2011

Kröger-Vodde, A.; Steinhüser, A.; Reise, C.

»Quality Assurance of PV Systems«, in: *Proceedings*, PV Workshop 2011, Sheffield, UK, 30.6.2011

Kurz, T.; Keller, J.

»Design and Characterisation of a Portable High Temperature PEM Fuel Cell Module«, 15th European Fuel Cell Forum 2011, Lucerne, Switzerland, 28.6.–1.7.2011

Lindekugel, S.; Flatten, L.; Janz, S.; Dore, J. (CSG Solar Pty Ltd, Botany, Australia)

»Solid Phase Crystallisation and Rapid Thermal Annealing Processes for Crystalline Silicon on Glass in a Movable Two Sided Halogen Lamp Oven«, in: *Proceedings*, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011

Link, J.

»Smart Grids & Energy Storage; Introduction & Overview«, in: *Proceedings*, Renewable Energy Week 2011 Expert Workshop 2011, Berlin, Germany, 15.9.2011

Link, J.

»Virtual Power Plants; Introduction & Overview«, in: *Proceedings*, Renewable Energy Week 2011 Expert Workshop 2011, Berlin, Germany, 15.9.2011

Lohmüller, E.; Thaidigsmann, B.; Bartsch, J.; Harmel, C.; Specht, J.; Wolf, A.; Clement, F.; Hörteis, M.; Biro, D.

»Advanced Metallization of Rear Surface Passivated Metal Wrap through Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings*, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011, pp. 546-551
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.180>)

Löper, P.; Hiller, D. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Janz, S.; Hermle, M.; Glunz, S. W.; Zacharias, M. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany)

»Optoelectronic Properties of Silicon Quantum Dots«, in: *Proceedings*, Quantsol 2011, Bad Hofgastein, Austria, 20.–26.3.2011

Mack, S.; Scheffler, D.; Wotke, E. A.; Reinwand, D.; Nold, S.; Savio, C.; Bitnar, B. (Solarworld Innovations GmbH, Freiberg, Germany); Wolf, A.; Biro, D.

»High Capacity Inline Annealing for High Efficiency Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings*, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011

Mack, S.; Wufka, C.; Wolf, A.; Belledin, U.; Scheffler, D.; Biro, D.

»Surface Passivation of Phosphorus-Diffused Emitters by Inline Thermal Oxidation«, in: *Proceedings*, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011, pp. 343-348
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.147>)

Maurer, C.; Baumann, T. (freier Architekt, Berlin, Germany); Kuhn, T.

»Variable g-Value of Transparent Façade Collectors«, in: *Energy and Buildings*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Maurer, C.; Baumann, T. (Peter Berchtold Ing.-Büro, Sarnen, Switzerland); Hermann, M.; Di Lauro, P.; Pavan, S. (Permasteelisa S.p.A., Treviso, Italy); Michel, L. (Interpane Entwicklungs- und Beratungsgesellschaft, Lauenförde, Germany); Kuhn, T.
»Heating and Cooling in High-Rise Buildings Using Facade Integrated Transparent Solar Thermal Collector Systems«, in: *Proceedings, Building Simulation 2011, IBPSA, Sydney, Australia, 14.–16.11.2011, CD-ROM*

Maurer, C.; Kuhn, T.
»Transparente solarthermische Fassadenkollektoren: Neuer TRNSYS-Type und erste Validierungsergebnisse«, in: *Proceedings, 21. Symposium Thermische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein, Germany, 11.–13.5.2011, CD-ROM*

Mehnert, S.; Kramer, K.; Kovacs, P. (Technical Research Institute of Sweden, Boras, Sweden); Dias, P. (European Solar Thermal Industry Federation, Bruxelles, Belgium); Fischer, S. (Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany); Mateu, E. (Centro Nacional de Energias Renovables, Sarriguren, Spain); Navarro, P. (Instituto Tecnológico De Canarias, Santa Lucia, Las Palmas, Spain); Helminger, F. (Austrian Institute of Technology, Vienna, Austria)
»Towards a New Global Standard«, in: *Proceedings, Solar World Congress 2011, Kassel, Germany, 28.8.–2.9.2011, CD-ROM*

Mende, S.; Wienold, J.
»Analyse des visuellen Komforts & Leistungsverhaltens von transparenter kristalliner gebäudeintegrierter Photovoltaik«, in: *Proceedings, Anwendungsforum Lichttechnik 2011, Regensburg, Germany, 23./24.3.2011, CD-ROM*

Miara, M.; Russ, C.; Günther, D.; Kramer, T.
»Efficiency of Heat Pump Systems Under Real Operating Conditions«, in: *Proceedings, 10th International Heat Pump Conference 2011, Tokyo, Japan, 16.–19.5.2011, CD-ROM*

Michl, B. T.; Rüdiger, M.; Giesecke, J. A.; Hermle, M.; Warta, W.; Schubert, M. C.
»From Injection Dependent Lifetime to Solar Cell Efficiency«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Mohr, A. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Engelhart, P. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Klenke, C. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Wanka, S. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Stekolnikov, A. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Scherff, M. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Seguin, R. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Tardon, S. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Rudolph, T. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Hofmann, M. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Stenzel, F. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Lee, J. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Diez, S. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Wendt, J. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Schmidt, S. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Müller, J. W. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Wawer, P. (Q-Cells, Bitterfeld-Wolfen, Germany); Hofmann, M.; Saint-Cast, P.
»20%-Efficient Rear Side Passivated Solar Cells in Pilot Series Designed for Conventional Module Assembling«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Moldovan, A.; Oltersdorf, A.; Zimmer, M.; Rentsch, J.
»Evaluation of Different Wafer Cleaning Processes before Thermal Oxidation for PV Devices«, in: *Microelectronics Engineering, Surface Preparation and Cleaning Conference 2011, Austin, TX, USA, 21.–23.3.2011*

Morgenstern, A.
»Solare Kühlung – Stand der Entwicklung und Ergebnisse von Praxistests«, *Energieberatung Thüringen 2011, Jena, Germany, 5.7.2011*

Morgenstern, A.; Henning, H.-M.; Wiemken, E.; Nunez, T.; Schossig, P.
»Solar Cooling – Technologies and Markets – Status Report on IEA SHC Task 38 ›Solar Air-Conditioning and Refrigeration‹«, in: *Proceedings, 10th IEA Heat Pump Conference 2011, Tokyo, Japan, 16.–19.5.2011, CD-ROM*

Morgenstern, A.; Weber, C.; Nunez, T.; Mauro, A. (Politecnico di Milano, Milano, Italy); Chéze, D. (CEA-INES, Chambéry, France); Boudéhenn, F.; Mugnier, D. (TECSOL, Perpignan, France); Siré, R. (TECSOL, Perpignan, France); Berger, M. (PSE AG, Freiburg, Germany)
»Monitoring Results and Conclusions of the Solar Cooling Systems Installed in the Frame of the Project ›SOLERA‹«, in: *Proceedings, 4th International Conference Solar Air-Conditioning 2011, Larnaka, Cyprus, 12.–14.10.2011, CD-ROM*

Müller, R.; Löper, P.; Hiller, D. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Gutsch, S.; Keding, R.; Reichel, C.; Bivour, M.; Hermle, M.; Janz, S.; Goldschmidt, J. C.; Zacharias, M. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Glunz, S. W.

»Calculation of the Quasi Fermi-Level Splitting in an Ideal Superlattice of Silicon Nanocrystals«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Nievendick, J.; Kwapil, W.; Rentsch, J.

»Influence of Trench Structures Induced by Texturization on the Breakdown Voltage of Multicrystalline Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 37th IEEE PVSC 2011, Seattle, WA, USA, 19.–24.6.2011*

Nievendick, J.; Specht, J.; Zimmer, M.; Zahner, L.; Glover, W.; Stüwe, D.; Biro, D.; Rentsch, J.

»An Industrially Applicable Honeycomb Texture«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Nold, S.; Abmus, M.; Weil, A.; Haunschild, J.; Savio, C.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.; Kunz, M. (J. Schmalz GmbH, Glatten, Germany)

»Investigations on the Impact of Wafer Grippers on Optical and Electrical Properties of Alkaline Textured and a-Si Passivated Surfaces«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Oliva, A.; Stryi-Hipp, G.; Kobelt, S. (Solar- und Wärmetechnik Stuttgart, Stuttgart, Germany); Bestenlehner, D. (Solar- und Wärmetechnik Stuttgart, Stuttgart, Germany); Drück, H. (Solar- und Wärmetechnik Stuttgart, Stuttgart, Germany); Bühl, J. (Technische Universität Ilmenau, Ilmenau, Germany); Rubeck, P. (Sonnenhaus-Institut e.V., Schleching, Germany)

»SolarAktivhaus: Untersuchte Gebäude mit einem solarthermischen Deckungsanteil von mehr als 50% und Monitoringkonzept«, in: *Proceedings, 3. Symposium Aktiv-Solarhaus 2011, Regensburg, Germany, 27./28.9.2011, CD-ROM*

Oltersdorf, A.; Bayer, M.; Zimmer, M.; Rentsch, J.

»Investigation of Metal Contamination in Cleaning Bathes for PV Processes«, in: *Microelectronics Engineering, SEMATECH Surface Preparation and Cleaning Conference 2011, Austin, TX, USA, 21.–23.3.2011*

Oltersdorf, T.; Höhle, S.; Wapler, J.; Henning, H.-M.

»Natural Circulation Defrosting in Fin-and-Tube Heat Exchangers with Highly Distributed Refrigerant Mass Flow«, in: *Proceedings, Heat Pump Conference 2011, Tokyo, Japan, 16.–19.5.2011, CD-ROM*

Oltersdorf, T.; Oliva, A.; Henning, H.-M.

»Experimentelle Untersuchung eines Direktverdampfers für solar unterstützte Luft/Wasser-Wärmepumpen kleiner Leistung mit zwei Wärmequellen«, in: *Proceedings, 21. Solarthermie Symposium 2011, Bad Staffelstein, Germany, 11.–13.5.2011, CD-ROM*

Orellana Perez, T.; Funke, C. (TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany); Fütterer, W. (TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany); Riepe, S.; Möller, H. J. (TU Bergakademie Freiberg, Freiberg, Germany); Tejado Garrido, E. M. (Universidad Politécnica de Madrid-CSIC, Madrid, Spain); Pastor Caño, J. Y. (Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain)

»Impact of Impurities on the Mechanical Strength of Multicrystalline Silicon«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Pearsall, N. (Northumbria Photovoltaics Applications Center, Newcastle upon Tyne, UK); Bett, A. W.; Bonemazzi, F. (ENEL Green Power, Rome, Italy); Dimmler, B. (Würth Solar, Stuttgart, Germany); Glunz, S.; Poortmans, J. (IMEC, Leuven, Belgium); Strauss, P. (Fraunhofer IWES, Kassel, Germany)

»Updating the European Strategic Research Agenda«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Pelzer, D.; Peters, M.; Hauser, H.; Rüdiger, M.; Bläsi, B.

»Diffractive Structures for Advanced Light Trapping in Silicon Solar Cells«, *Quantum Winter Workshop 2011, Bad Hofgastein, Austria, 20.–26.3.2011*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Peters, M.; Battaglia, C. (EPFL, Lausanne, France); Aberle, A. G. (SERIS, Singapore, Singapore); Luther, J. (SERIS, Singapore, Singapore); Bläsi, B.; Glunz, S.

»3D Optical Simulation of Scattering in Thin Film Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Pfafferott, J. (Hochschule Offenburg, Offenburg, Germany); Fischer, M.; Kalz, D. E.

»Low-Energy Buildings with Night Ventilation and Air-to-Air Heat Exchangers – Case Studies and Analysis«, in: *Proceedings, TightVent Conference – Towards Optimal Airtightness Performance 2011, Brussels, Belgium, 12./13.10.2011*

Pfafferott, J.; Nüßle, F. (ZENT-FRENGER Gesellschaft für Gebäudetechnik, Heppenheim, Germany)

»Kühldeckensystem mit thermischer Aktivierung der Betondecke«, in: *HLH Lüftung/Klima, Heizung/Sanitär, Gebäudetechnik 62 (2011), No. 5, pp. 17-21*

Philipp, D.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.

»Interlaboratory Comparison of UV-Light Sources for Accelerated Durability Testing of PV-Modules«, in: *Proceedings, SPIE Optics and Photonics 2011, San Diego, CA, USA, 21.–26.8.2011*

Philipps, S.

»Günstige Energie für sonnenreiche Länder – Konzentrierende Photovoltaik ermöglicht hohe Wirkungsgrade«, in: *GoingPublic Sonderausgabe »Cleantech 2011«*

Philipps, S.; Bett, A. W.; Bläsi, B.; Glunz, S.; Goldschmidt, J. C.; Janz, S.; Preu, R.; Reber, S.; Wirth, H.

»Aktuelle Entwicklungen in der PV-Forschung mit einem Schwerpunkt auf Photovoltaik und Photonenmanagement«, 1. Treffen der AG Solartechnik 2011, *Photonics BW / Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany, 29.11.2011*

Philipps, S.; Bett, A.; Burger, B.; Ebert, G.; Stryi-Hipp, G.; Rohrig, K. (Fraunhofer IWES, Bremerhaven, Germany); Strauß, P. (Fraunhofer IWES, Bremerhaven, Germany); Krautkremer, B. (Fraunhofer IWES, Bremerhaven, Germany); Gils, H. C. (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Köln, Germany); Hauser, G. (Fraunhofer IBP, Stuttgart, Germany); Brabec, C. J. (Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Garching, Germany); Ebert, H.-P. (Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Garching, Germany); Hauer, A. (Bayerische Zentrum für Angewandte Energieforschung e.V., Garching, Germany)

»Perspektiven für das Zusammenspiel von Energieeffizienz und Erneuerbaren sowie ihre Einbindung in das Energiesystem«, in: *Proceedings, FVEE-Jahrestagung 2011, Berlin, Germany, 12.10.–13.9.2011, CD-ROM*

Piechulla, P.; Seiffe, J.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Increased Ion Energies for Texturing in a High-Throughput Plasma Tool«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Posdziech, J.; Wiegand, M.-C. (University of Paderborn, Paderborn, Germany); Dyrba, M. (Centre for Innovation Competence SiLi-nano, Halle-Wittenberg, Germany); Schweizer, S. (Centre for Innovation Competence SiLi-nano, Halle-Wittenberg, Germany); Hermle, M.; Goldschmidt, J. C.

»Characterization of Infrared-Active Fluorescent Concentrators«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Pospischil, M.; Specht, J.; Clement, F.; Biro, D.; Zengerle, K. (Kissel + Wolf GmbH, Wiesloch, Germany); Birkle, G. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Koltay, P. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Zengerle, R. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Henning, A. (W.C. Heraeus GmbH, Hanau, Germany); Neidert, M. (W.C. Heraeus GmbH, Hanau, Germany); Mohr, C. (W.C. Heraeus GmbH, Hanau, Germany)

»Investigations of Thick-Film-Paste Rheology for Dispensing Applications«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011*

Rachow, T.; Künle, M.; Janz, S.; Reber, S.

»Direct Deposition of $\mu\text{-Si}$ Films with APCVD on Borosilicate Glass«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Rau, S.; Fuentes, R. (University of South Carolina, Columbia, SC, USA); Colom Tomás, J.; Smolinka, T.; Weidner, J. (University of South Carolina, Columbia, SC, USA)

»PEM Electrolyzer with Nano-Structured Electrodes for High Efficient Hydrogen Production«, 4. *Electrochemical Energy Conversion and Storage 2010, Nice, France, 26.9.–1.10.2011*

Rau, S.; Yanwouo, A.; Peharz, G.; Smolinka, T.

»High Efficient Solar Hydrogen Generation Using a HyCon® System«, 15th *European Fuel Cell Forum 2011, Lucerne, Switzerland, 28.6.–1.7.2011*

Rauer, M.; Schmiga, C.; Krause, J.; Woehl, R.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Further Analysis of Aluminum Alloying for the Formation of p^+ Regions in Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011, pp. 200-206*
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.124>)

Reichert, S.

»Grid Integration of PV and Grid Codes«, in: *Proceedings, Power Electronics for Photovoltaics 2011, Munich, Germany, 6./7.6.2011, pp. 329-346*

Reichert, S.

»Netzstabilisierung mit PV-Wechselrichter«, in: *Proceedings, Intersolar Conference – PV Energy World 2011, Munich, Germany, 9.6.2011*

Reise, C.; Kröger-Vodde, A.; Dirnberger, D.; Kiefer, K.

»Quality Assurance Measures for Optimal PV Yields«, in: *Proceedings, 1st Solar Industry Summit UK 2011, London, UK, 12./13.5.2011*

Richter, A.; Benick, J.; Kalio, A.; Seiffe, J.; Hörteis, M.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Towards Industrial N-Type PERT Solar Cells: Rear Passivation and Metallization Scheme«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011, pp. 479-486*
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.169>)

Rist, T.; Hermle, M.; Goldschmidt, J. C.

»Monte Carlo Simulation of Complex Fluorescent Concentrator Systems«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Rochlitz, L.; Koch, W.; Aicher, T.

»Bio-Ethanol Reformer with HT-PEM Fuel Cell for Residential Combined Heat and Power Generation«, in: *Proceedings, European Fuel Cell Forum 2011, Lucerne, Switzerland, 28.6.–1.7.2011*

Rogalla, S.

»Central Inverters«, in: *Proceedings, Power Electronics for Photovoltaics 2011, Munich, Germany, 6./7.6.2011, CD-ROM*

Roth, W.

»Netzferne Stromversorgung mit Photovoltaik«, in: *Proceedings, Fachforum Netzferne Stromversorgung mit Photovoltaik 2011, Freiburg, Germany, 4./5.10.2011, CD-ROM*

Rüdiger, M.; Rauer, M.; Schmiga, C.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Accurate Modelling of Aluminum-Doped Silicon«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011, pp. 527-532*
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.177>)

Ruschenburg, J.; Baisch, K.; Herkel, S.

»Experimental and Simulation Results on a Solar-Assisted Heat Pump Prototype for Decentral Applications«, in: *Proceedings, 10th IEA Heat Pump Conference 2011, Tokyo, Japan, 16.–19.5.2011, CD-ROM*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Russ, C.; Miara, M.; Hopfer, M. (E.ON Vertrieb Deutschland GmbH, München, Germany)
»Wärmepumpenanlagen in Neubauten und im Gebäudebestand – Ergebnisse von Feldtestmessungen«, in: »Wohnen« des VdW Bayern (2011), No. 2
- Saint-Cast, P.; Billot, E.; Olwal, P.; Kühnhold, S.; Richter, A.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.
»Surface Passivation of Highly and Lowly Doped P-Type Silicon Surfaces with PECVD Al₂O₃ for Industrially Applicable Solar Cell Concepts«, in: Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011
- Saint-Cast, P.; Haunschild, J.; Schwab, C.; Billot, E.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.
»Metal Pinning through Rear Passivation Layers: Characterization and Effects on Solar Cells«, in: Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011
- Saint-Cast, P.; Heo, Y.-H.; Billot, E.; Olwal, P.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Glunz, S. W.; Ralf, P.
»Variation of the Layer Thickness to Study the Electrical Property of PECVD Al₂O₃/C-Si Interface«, in: Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011
- Schachtner, M.; Hoheisel, R.; Sabuncuoglu, F.; Siefer, G.; Bett, A. W.; Darou, S. (Aescusoft Automation GmbH, Freiburg, Germany); Spinner, D. (Aescusoft Automation GmbH, Freiburg, Germany)
»A New Tool to Measure Monolithic Multi Junction Solar Cells with up to Six Subcells«, in: Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011
- Schick Tanz, M.
»Influence of Temperature Fluctuations on the Operational Behaviour of Adsorption Chillers«, in: Proceedings, International Sorption Heat Pump Conference 2011, Padua, Italy, 6.–8.4.2011, CD-ROM
- Schick Tanz, M.; Kumuda Rajgopal, N. K.; Neumann, H.; Nunez, T.
»Optimized Control Strategy of a Combined Heating, Cooling and Power System«, in: Proceedings, International Sorption Heat Pump Conference 2011, Padua, Italy, 6.–8.4.2011, CD-ROM
- Schick Tanz, M.; Wapler, J. (PSE AG, Freiburg, Germany); Henning, H.-M.
»Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung: Primärenergieeinsparung und Wirtschaftlichkeit?«, in: KI Kälte, Lüftung, Klima
- Schill, C.; Brachmann, S.; Heck, M.; Koehl, M.
»Impact of Heavy Soiling on the Power Output of PV-Modules«, SPIE Optics and Photonics 2011, San Diego, CA, USA, 21.–25.8.2011
- Schillinger, K.; Janz, S.; Reber, S.
»APCVD of 3C-SiC for Silicon Thin-Film Solar Cells on Various Substrates«, in: Journal of Nanoscience and Nanotechnology, EuroCVD 18 2011, Kinsale, Ireland, 5.–9.9.2011
- Schmidt, C.; Notz, S.; Striewe, W.; Ansari, J.; Jung, A.; Kramer, K.
»Evaluation Procedure for Storage Tank Tests Using the Combination of TRNSYS with GenOpt and New Proposal for Holistic Error Estimation«, in: Proceedings, Solar World Congress 2011, Kassel, Germany, 28.8.–2.9.2011, CD-ROM
- Schmidt, C.; Striewe, W.; Jung, A.; Welz, C. (PSE AG, Freiburg, Germany); Kramer, K.
»Vermessung von thermischen Solarspeichern nach EN 12977 und Parameteridentifikation mit GenOpt«, in: Proceedings, 21. Symposium Thermische Solarenergie 2010, Bad Staffelstein, Germany, 11.–13.5.2011
- Schmidt, P.; Heck, M.; Köhl, M.; Weiß, K.-A.
»Alterungsbeständigkeit von Kollektoren und Komponenten: Prüfungen in verschiedenen Klimaregionen«, 21. Symposium Thermische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein, Germany, 11.–13.5.2011

Schnabel, M.; Witzky, A.; Löper, P.; Gradmann, R. (Fraunhofer ISC, Würzburg, Germany); Künle, M.; Janz, S.

»Electrical Properties of Recrystallised SiC Films from PECVD Precursors for Silicon Quantum Dot Solar Cell Applications«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Schubert, M. C.; Gundel, P.; Schön, J.; Habenicht, H.; Kwapil, W.; Heinz, F.; Warta, W.

»New Methods for Spatially Resolved Characterization of Defects in Silicon«, in: *Proceedings, 21st NREL Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells & Modules: Materials and Processes 2011, Breckenridge, CO, USA, 31.7.–3.8.2011*

Schumann, M.; Haas, T.; Orellana Perez, T.; Riepe, S.

»Grain Size Distribution of Multicrystalline Silicon for Structure Characterization of Silicon Wafers«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Schwab, C.; Thaidigsmann, B.; Linse, M.; Wolf, A.; Clement, F.; Prince, A. (DuPont Ltd., Bristol, UK); Young, R. (DuPont Ltd., Bristol, UK); Weigand, P. (DuPont de Nemours GmbH, Neu Isenburg, Germany)

»Screen Printed Al-Pastes for LFC Solar Cells«, 3rd Metallization Workshop 2011, Charleroi, Belgium, 25./26.10.2011

Schwab, C.; Thaidigsmann, B.; Nold, S.; Linse, M.; Lottspeich, F.; Prince, A. (Du Pont de Nemours GmbH, Neu-Isenburg, Germany); Young, R. (Du Pont Limited, Frenchay, U.K.); Fuge, G. (Du Pont Limited, Frenchay, U.K.); Weigand, P. (Du Pont de Nemours GmbH, Neu-Isenburg, Germany); Wolf, A.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.

»Screen Printing Aluminium Pastes for Thin Silicon Solar Cells with Passivated Rear Surface and LFC Contacts«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Seifert, H.; Hohl-Ebinger, J.; Warta, W.

»Spectral Influences on Measurement Uncertainty of a-Si μ c-Si Multi-Junction Solar Devices«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Seiffe, J.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Influence of Slow Surface States on Effective Lifetime Measurements«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011, pp. 106-114*
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.110>)

Sevenig, F.; Breitenstein, L.; Oltersdorf, A.; Zimmermann, K.; Hermle, M.

»Investigation on the Impact of Metallic Surface Contaminations on Minority Carrier Lifetime of a-Si:H Passivated Crystalline Silicon«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011, pp. 288-293*
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.138>)

Sinton, R. A. (Sinton Instruments, Boulder, CO, USA); Haunschild, J.; Demant, M.; Rein, S.

»Comparing Lifetime and PL-Imaging Pattern Recognition Methodologies for Predicting Solar Cell Results Based on As-Cut Wafer Properties«, in: *Proceedings, 21. PVSEC 2011, Fukuoka, Japan, 28.11.–2.12.2011*

Smolinka, T.

»Speicherkonzepte zum mittelfristigen Lastausgleich: Redox-Flow-Batterien«, *Energiespeicherung – Zukunftskonzepte im Zeitalter EE, Weiterbildungszentrum Brennstoffzelle Ulm e.V., Ulm, Germany, 12./13.5.2011*

Smolinka, T.; Garche, J. (FCBAT, Ulm, Germany); Hebling, C.; Ehret, O. (NOW GmbH, Berlin, Germany)

»Stand der Entwicklung von GroÙelektrolyseuren«, in: *Proceedings, 18. Symposium REGWA 2011, Stralsund, Germany, 3.–5.11.2011, pp. 100-105*

Smolinka, T.; Rau, S.; Ojong, E. T.; Hebling, C.

»Cell and Stack Design for High Pressure Operation of PEM Water Electrolyzers«, *Hydrogen and Fuel Cells 2011, Canadian Hydrogen and Fuel Cell Association, Vancouver, Canada, 15.–18.5.2011*

Sonner, C.; Oltersdorf, A.; Zimmer, M.; Rentsch, J.

»Influence of Contaminations and Cleaning Sequences on Alkaline Texturisation«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Spitz, M.; Rein, S.

»Impact of Potential Barriers at Grain Boundaries of Multi Crystalline Silicon Wafers on Inductively Coupled Resistivity Measurements«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Steiner, M.; Medvidovic, J.; Siefer, G.; Bett, A. W.

»Increasing the Energy Yield of CPV Modules Through Optimized Solar Cell Interconnection«, in: *Proceedings, CPV-7 2011, Las Vegas, NV, USA, 4.–6.4.2011*

Steinkemper, H.; Fischer, S.; Krämer, K. W. (University of Bern, Bern, Switzerland); Biner, D. (University of Bern, Bern, Switzerland); Hermle, M.; Goldschmidt, J. C.

»Investigation on the Intensity Dependence of Upconversion Systems«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Stryi-Hipp, G.

»Solar Thermal Technology for Heating and Cooling: Market Perspectives and Research Topics – Flat Plate Collectors – Principles for Design«, *Energy Workshop 2011, US Army, Las Vegas, USA, 28.1.2011*

Stryi-Hipp, G.; Kramer, K.; Richter, J.; Thoma, C.; Fortuin, S.; Mehnert, S.; Welz, C.

»Towards a Unified Standard for Solar Air Heating Collectors«, in: *Proceedings, Solar World Congress 2011, Kassel, Germany, 28.8.–2.9.2011, CD-ROM*

Stryi-Hipp, G.; Oliva, A.; Fortuin, S.

»Optimization of Solar Thermal Combi-Systems for Domestic Hot Water and Space Heating«, in: *Proceedings, Solar World Congress 2011, Kassel, Germany, 28.8.–2.9.2011, CD-ROM*

Szolak, R.; Susdorf, A.; Aicher, T.

»Pyrolysis, a Low Cost Multi-Fuel Processor for Fuel Cells«, *European Fuel Cell Forum 2011, Lucerne, Switzerland, 28.6.–1.7.2011*

Thaidigsmann, B.; Clement, F.; Wolf, A.; Fertig, F.; Biro, D.; Preu, R.

»HIP-MWT: A Simplified Structure for Metal Wrap through Solar Cells with Passivated Rear Surface«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011 pp. 498-205*

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.172>)

Thaidigsmann, B.; Lohmüller, E.; Spribille, A.; Linse, M.; Mack, S.; Jäger, U.; Pospischil, M.; Eitner, U.; Haunschild, J.; Wolf, A.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.

»MWT Cell Structures for High Efficiency and Low Cost«, *MWT Workshop 2011, Freiburg, Germany, 10.11.2011*

Thaidigsmann, B.; Spribille, A.; Plagwitz, H. (Sunways AG, Konstanz, Germany); Schubert, G. (Sunways AG, Konstanz, Germany); Fertig, F.; Clement, F.; Wolf, A.; Biro, D.; Preu, R.

»HIP-MWT – a New Cell Concept for Industrial Processing of High-Performance Metal Wrap Through Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Thaidigsmann, B.; Werner, S.; Gutscher, S.; Fertig, F.; Clement, F.; Wolf, A.; Biro, D.

»Manipulation of the Reverse Bias Behaviour of Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 21st PVSEC 2011, Fukuoka, Japan, 28.11.–2.12.2011*

Thoma, C.; Richter, J.; Mehnert, S.; Kramer, K.; Stryi-Hipp, G.

»Optimierung und Validierung des Luftkollektorteststandes im Rahmen des Projektes Luko-E«, in: *Proceedings, 21. Symposium Thermische Solarenergie 2011, Bad Staffelstein, Germany, 11.–13.5.2011, CD-ROM*

Treichel, H. (Sunsonix, Milpitas, CA, USA); Goldstein, A. (Sunsonix, Milpitas, CA, USA); George, M. (Sunsonix, Milpitas, CA, USA); Bohling, D. (Sunsonix, Milpitas, CA, USA); Rentsch, J.;

Oltersdorf, A.; Zimmer, M.; Ostrowski, S. (Evans Analytical Group, Sunnyvale, CA, USA); Mowat, I. (Evans Analytical Group, Sunnyvale, CA, USA); Wang, L. (Evans Analytical Group, Sunnyvale, CA, USA); Kern, W. (Werner Kern Associates, East Windsor, NJ, USA)

»Removal of Trace Metals Using a Biodegradable Complexing Agent«, in: *PV International (2011), No. 13*

Trogus, D.; Seiffe, J.; Pillath, F.; Hofmann, M.; Wolf, A.; Rentsch, J.
 »Phosphoric Anti-Reflective Coatings as Dopant Source and Front-Side Passivation for Industrial Silicon Solar Cell Manufacturing«,
 in: Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011

van Riesen, S. (Concentrix Solar GmbH, Freiburg, Germany);
 Gombert, A. (Concentrix Solar GmbH, Freiburg, Germany);
 Gerster, E. (Concentrix Solar GmbH, Freiburg, Germany);
 Gerstmaier, T. (Concentrix Solar GmbH, Freiburg, Germany);
 Jaus, J.; Eltermann, F.; Bett, A. W.
 »Concentrix Solar's Progress in Developing Highly Efficient Modules«, CPV-7 2011, Las Vegas, NV, USA, 4.–6.4.2011

Vetter, M.
 »Available Battery Systems and Their Perspectives«, in: Proceedings, Deutsches Eigenkapitalforum 2011 – Branchenforum Clean Energy 2011, Frankfurt, Germany, 21.11.2011, CD-ROM

Vetter, M.
 »Batteries and Battery Systems«, in: Proceedings, Solar Summit 2011, Freiburg, Germany, 14./15.11.2011, CD-ROM

Vetter, M.
 »Battery System Technology – From Cells to Systems«,
 in: Proceedings, Battery Workshop 2011, Sendai and Yokkaichi, Japan, 28.2.–7.3.2011, CD-ROM

Vetter, M.
 »Battery System Technology«, in: Proceedings, SKA-Workshop 2011, Berlin, Germany, 7.4.2011, CD-ROM

Vetter, M.
 »Battery Systems Technology – From Cells to Systems«,
 in: Proceedings, 2nd Annual German American eMobility Forum 2011, Southfield, MI, USA, 27.9.2011, CD-ROM

Vetter, M.
 »Battery Technologies and System Concepts for Decentralized Grid Connected PV Systems«, in: Proceedings, Intersolar North America 2011, San Francisco, CA, USA, 11.7.2011

Vetter, M.
 »Decentralized Power Generation – Energy Storage and Grid Integration in Light of Grid-Connected PV Battery Systems«,
 in: Proceedings, Intersolar Conference 2011, Munich, Germany, 6.6.2011, CD-ROM

Vetter, M.
 »Dezentrale netzgekoppelte PV-Batteriesysteme«, in: Proceedings, Netzferne Stromversorgung und Photovoltaik 2011, Freiburg, Germany, 4./5.10.2011, CD-ROM

Vetter, M.
 »Dezentrale netzgekoppelte PV-Batteriesysteme«, in: Proceedings, Intersolar Conference – PV Energy World 2011, Munich, Germany, 8.6.2011, CD-ROM

Vetter, M.
 »Innovative Stromspeichersysteme bei fluktuierenden Energiemengen«, in: Proceedings, Energiewende – Die Perspektive des Energiespeicherbaus 2011, Stuttgart, Germany, 26.10.2011, CD-ROM

Vetter, M.; Rohr, L.; Ortiz, B.; Schies, A.; Schwunk, S.; Wachtel, J.
 »Dezentrale netzgekoppelte PV-Batteriesysteme«, in: VDI-Bericht, VDI-Konferenz Elektrische Energiespeicher 2011, Wiesbaden, Germany, 18./19.5.2011

Volk, A.-K.; Jäger, U.; Rentsch, J.; Preu, R.
 »A Novel Approach for Mask-Free Selective Emitter Technology Combining Laser Doping and Wet Chemical Etch Back«,
 in: Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011

Went, J.; Rippberger, S. (Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany)
 »Ultraschallunterstützte Crossflow-Filtration/Teil 1: Leistungultraschalleintrag in die Flüssigkeit«, in: F & S Filtrieren und Separieren 25 (2011), No. 3

Went, J.; Rippberger, S. (Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany)
 »Ultraschallunterstützte Crossflow-Filtration/Teil 2: Direkte Körperschallanregung der Membran«, in: F & S Filtrieren und Separieren 25 (2011), No. 4

SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Went, J.; Schies, A.; Anhalt, J.; Vetter, M.

»Experiences with a PV-Driven Seawater Desalination System Using a Control Strategy for Operation Without Batteries«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011, CD-ROM*

Wiemken, E.; Henning, H.-M.

»Appropriate Solutions Using Solar Energy – Basic Comparison of Solar Thermal and Photovoltaic Approaches«, in: *Proceedings, 4th International Conference Solar Air-Conditioning 2011, Larnaka, Cyprus, 12.–14.10.2011, CD-ROM*

Wienold, J.; Frontini, F. (Institute for Applied Sustainability to the Built Environment, Canobbio, Switzerland); Herkel, S.; Mende, S.

»Climate Based Simulation of Different Shading Device Systems for Comfort and Energy Demand«, in: *Proceedings, Building Simulation 2011, IBPSA, Sydney, Australia, 14.–16.11.2011*

(online available: http://www.ibpsa.org/m_papers.asp)

Wiesenfarth, M.; Eltermann, F.; Helmers, H.; Steiner, M.; Röder, K.; Dörsam, T.; Siefer, G.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Co-Generation of Electrical Power and Thermal Energy in CPV Systems«, *Spring Conference 2011, EMRS, Nice, France, 10.5.2011*

Wiesenfarth, M.; Jaus, J.; Siefer, G.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Thermisches Management in der Konzentratorphotovoltaik«, *5. Tagung Elektronikkühlung 2011, Haus der Technik, Stuttgart, Germany, 24.5.2011*

Wilson, H. R.; Fath, K. (Karlsruhe Institut of Technology, Karlsruhe, Germany); Hartmann, A. (Technische Universität Dresden, Dresden, Germany); Hemmerle, C. (Technische Universität Dresden, Dresden, Germany); Kuhn, T. E.; Stengel, J. (Karlsruhe Institut of Technology, Karlsruhe, Germany); Schultmann, P. D. (Karlsruhe Institut of Technology, Karlsruhe, Germany); Weller, P. D. (Technische Universität Dresden, Dresden, Germany)

»Life-Cycle Cost Assessment of Photovoltaic Façade Panels«, in: *Proceedings, 6th Energy Forum on Solar Building Skins 2011, Bressanone, Italy, 6./7.12.2011, CD-ROM*

Wilson, H. R.; Bretschneider, J. (International Commission on Glass – Technical Committee 10); Hofmann, T. (International Commission on Glass – Technical Committee 10); Hutchins, M. (International Commission on Glass – Technical Committee 10); Jonsson, J. (International Commission on Glass – Technical Committee 10); Kermel, C. (International Commission on Glass – Technical Committee 10); Marenne, I. (International Commission on Glass – Technical Committee 10); Roos, A. (International Commission on Glass – Technical Committee 10); van Nijnatten, P. (International Commission on Glass – Technical Committee 10)

»Transmittance of Patterned ›Solar Glass‹ Panes – Results of a Measurement Round Robin by ICG-TC10«, in: *Proceedings, Colloquium Optische Spektrometrie COSP 2011, Berlin, Germany, 21./22.3.2011, CD-ROM*

Wilson, H. R.; Trippe, A. (Karlsruhe, Germany); Kuhn, T.

»TCO-Analyse der Wirtschaftlichkeit von PV- und GIVP-Anlagen: Entwicklung einer Methodik und erste Ergebnisse«, in: *Proceedings, 3. Anwenderforum Gebäudeintegrierte Photovoltaik 2011, Bad Staffelstein, Germany, 1.3.2011, CD-ROM*

Winter, D.; Koschikowski, J.; Düver, D.

»Spiral Wound Modules for Membrane Distillation: Modelling, Validation and Module Optimization«, in: *Proceedings, International Conference on Membrane Distillation and Related Technologies 2011, Ravello, Italy, 9.–12.10.2011, CD-ROM*

Wirth, J.; Scharmach, K.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.

»Correction Methods and Stabilisation of Outdoor Measurements of Thin Film Modules«, in: *Proceedings, 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2011, Hamburg, Germany, 5.–9.9.2011*

Wirth, J.; Scharmach, K.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.

»Stabilisation Process and Airmass Influences for Outdoor Exposure of Thin Film Modules«, *SPIE Optics and Photonics 2011, San Diego, CA, USA, 21.–25.8.2011*

Witte, K. T.; Dammel, F. (Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany); Schnabel, L.; Stephan, P. (Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany)
 »Heat Loss Evaluation of an Experimental Set-Up for Predicting the Initial Stage of the Boiling Curve«, in: *Proceedings, COMSOL Conference Stuttgart 2011, Ludwigsburg, Germany, 26.–28.10.2011, CD-ROM*

Witte, K. T.; Morgenstern, A.; Henning, H.-M.; Wiemken, E.; Nunez, T.; Schossig, P.
 »Solar Thermal Cooling – Technologies and Market Situation«, in: *Heat Pump Centre Newsletter (2011), No. 1*

Wittstadt, U.; Sapienza, A. (Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia/ Consiglio Nazionale delle Ricerche, Messina, Italy); Sonnenkalb, D.; Frazzica, A. (Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia/ Consiglio Nazionale delle Ricerche, Messina, Italy); Restuccia, G. (Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia/ Consiglio Nazionale delle Ricerche, Messina, Italy); Schnabel, L.
 »Adsorption Heat Exchangers – A Comparison of Two Experimental Methods for Their Characterization«, in: *Proceedings, International Heat Pump Conference 2011, Padua, Italy, 6.–8.4.2011*

Woehl, R.; Keding, R.; Rüdiger, M.; Clement, F.; Wilde, J. (Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany); Biro, D.
 »20% Efficient Aluminium-Alloyed Back-Contact Back-Junction Cells and Interconnection Scheme of Point-Shaped Metalized Cells«, in: *Proceedings, 37th IEEE PVSC 2011, Seattle, WA, USA, 19.–24.6.2011, CD-ROM*

Woehl, R.; Krause, J.; Granek, F.; Biro, D.
 »Highly Efficient All-Screen-Printed Back-Contact Back-Junction Silicon Solar Cell with Aluminium-Alloyed Emitter«, in: *Proceedings, 1st International Conference on Silicon Photovoltaics 2011, Freiburg, Germany, 17.–20.4.2011*
 (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2011.06.095>)

Wolf, A. J.; Hauser, H.; Nitsche, M.; Kübler, V.; Walk, C.; Höhn, O.; Bläsi, B.
 »Origination of Nano-and Microstructures on Large Areas by Interference Lithography«, in: *Proceedings, MicroNanoEngineering 2011, Berlin, Germany, 19.–23.9.2011*

Wolf, A.; Biro, D.; Hermle, M.; Preu, R.; Glunz, S.
 »Silicon Solar Cell Research and Development at Fraunhofer ISE – Status and Perspectives«, *Annual Meeting 2011, Oslo, Norway, 4.15.5.2011*

Ziegler, J.; Montesdeoca-Santana, A. (Universidad de La Laguna, Laguna, Spain); Platt, D.; Hohage, S.; Borchert, D.; Guerrero-Lemus, R. (Universidad de La Laguna, Laguna, Spain)
 »A Comparative Study of the Influence of P and N Doped Cz Base Material on the Performance of Silicon Based Heterojunction Solar Cells«, in: *Proceedings, 21st PVSEC 2011, Fukuoka, Japan, 28.11.–2.12.2011*

IMPRESSUM

Redaktion

Marion Hopf, Karin Schneider (Leitung)

Presse und Public Relations

Bildquellen

Air Products

ALDI SÜD Rastatt GmbH

Applied Materials

Michael Eckmann, Freiburg

Thomas Ernsting, Bonn

Fraunhofer ISE

Freiburger Stadtbau GmbH

Matthias Heyde, Berlin

Industrial Solar GmbH, Freiburg

Dirk Mahler, Neuruppin

Ansgar Pudenz/Deutscher Zukunftspreis

Joscha Rammelberg, Freiburg

Startdesign GmbH

Markus Steur, Dortmund

Synova SA

Universität Lund

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, 2012*