



**JAHRESBERICHT**  
**2012**

*Titelfoto:*

*Die Erfolgsgeschichte der Konzentrator-technologie wurde 2012 mit der Verleihung des Deutschen Umweltpreises fortgeschrieben. Dr. Andreas Bett vom Fraunhofer ISE und Hansjörg Lerchenmüller von Soitec Solar wurden von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für ihre Verdienste für Forschung und Industrie ausgezeichnet. In der Konzentrator-photovoltaik wird eine Linsenoptik eingesetzt, welche die Solarstrahlung 500fach auf winzige höchsteffiziente Mehrfach-solarzellen aus III-V-Halbleitern fokussiert. Andreas Bett arbeitet mit über 50 Kolleginnen und Kollegen am Fraunhofer ISE weiter daran, die Effizienz von Mehrfach-solarzellen zu verbessern und den Aufbau der Konzentrator-module zu optimieren. Soitec Solar hat das Konzept der Konzentrator-systeme erfolgreich in die Industrie transferiert und ist heute einer der Weltmarktführer. Der Deutsche Umweltpreis wurde durch Bundespräsident Joachim Gauck überreicht. 2011 war das Thema bereits unter den Finalisten für den Deutschen Zukunftspreis.*

# VORWORT



2012 erwies sich als ein schwieriges Jahr für die Solarbranche. Der durch Überkapazitäten und verstärkten internationalen Wettbewerb ausgelöste enorme Preisverfall bei Modulen brachte besonders die deutsche Photovoltaikbranche in wirtschaftliche Schwierigkeiten. Leider fehlten klare Signale und Richtlinien aus der Politik für die konsequente Umsetzung der 2011 beschlossenen Energiewende von fossilen und atomaren hin zu erneuerbaren Energiequellen. Der bis Mitte des Jahres 2012 anhaltende Streit um eine Überarbeitung des Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) löste dagegen Investitionsunsicherheiten aus. So kam es 2012 zu Abwicklung und Verkauf bekannter und traditionsreicher deutscher Marktteilnehmer. Zudem erlauben die derzeitigen Produktionsanlagen in Europa meist nicht, Module zu den heutigen, niedrigen Marktpreisen zu fertigen. Neue PV-Fabriken haben eine Jahresproduktion von 1–5 Gigawatt in modernster Technologie. Wir stehen deshalb vor der wichtigen Aufgabe, die deutsche PV-Ausrüsterindustrie in die Lage zu versetzen, derartige X-GW Fabriken anzubieten.

Nichtsdestotrotz bleibt die Energiewende eine große nationale Aufgabe und einmalige Chance für Deutschland, eine internationale Vorreiterrolle zu übernehmen. Das Fraunhofer ISE ist mit seinem breiten Themenspektrum in fast allen für eine CO<sub>2</sub>-freie Energieversorgung relevanten Forschungsfeldern präsent. Als größtes Solarforschungsinstitut in Europa arbeiten wir in den Themenfeldern Photovoltaik, Solarthermie, Energieeffizienz, Energiesystemtechnik und Energiespeicher. Durch diese große Bandbreite unserer Forschungsaktivitäten, unsere langjährige Erfahrung und natürlich aufgrund der hohen Kompetenz und Motivation unserer Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter blickt das Fraunhofer ISE auf ein wirtschaftlich und inhaltlich erfolgreiches Jahr 2012 zurück.

Ganz besonders stolz sind wir, dass Dr. Andreas Bett vom Fraunhofer ISE zusammen mit Hansjörg Lerchenmüller von Soitec Solar für ihre Verdienste um die Solartechnologieforschung in diesem Jahr mit dem Deutschen Umweltpreis geehrt wurden. Gewürdigt wurde damit auch die Konzentratorphotovoltaik, die in großen Kraftwerken in sonnenreichen Ländern zur Gewinnung von Strom aus Sonnenenergie eingesetzt wird. Was im kleinen Maßstab im Forschungslabor am Fraunhofer ISE unter Leitung von Dr. Andreas Bett begann, wird heute von Soitec Solar vermarktet und trägt – in industriellem Maßstab eingesetzt – zur Umsetzung der Energiewende auf internationaler Ebene bei.

Unser breites Kompetenzspektrum setzen wir vermehrt für einen ganzheitlichen Blick auf die Energieversorgung der Zukunft ein. So befassen wir uns intensiv mit der umfassenden Modellierung des deutschen Energiesystems und dessen Transformation hin zu einer vollständigen Versorgung aus erneuerbaren Quellen. Dazu stellten Dr. Hans-Martin Henning und Andreas Palzer 2012 erstmals eine umfangreiche Studie vor. Auf Basis von Stundenzeitreihen untersuchten sie in ihrer Simulation ein denkbare deutsches Energiesystem, das gänzlich auf erneuerbaren Energien basiert. Das Neuartige des Modells ist die ganzheitliche Betrachtung von Strom- und Wärmesektor, einschließlich der Reduktion des Energieverbrauchs durch energetische Gebäudesanierung. Im Rahmen der Simulation wurden auch Optimierungen vorgenommen, um aus der Vielzahl denkbarer Kombinationen aus Technologien und Effizienzsteigerungsmaßnahmen ein volkswirtschaftliches Optimum zu ermitteln.

Um der Forschung für ein CO<sub>2</sub>-freies Energiesystem der Zukunft auch international eine stärkere Stimme zu geben,

hat das Fraunhofer ISE im Juli mit zwei anderen führenden Solarforschungseinrichtungen ein Memorandum of Understanding (MoU) zur Gründung der Global Alliance of Solar Energy Research Institutes (GA-SERI) unterzeichnet. So soll mit dem National Renewable Energy Laboratory NREL (USA) des US-Energieministeriums DOE und dem National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST (Japan) die Zusammenarbeit und der wissenschaftliche Austausch verstärkt werden. Dazu sollen sich jeweils zwei Wissenschaftler jedes Instituts zu Forschungszwecken in den anderen beiden Einrichtungen aufhalten.

Die Energiewende in Deutschland bedarf gesamtgesellschaftlicher Anstrengungen und so wird erfreulicherweise auch in der breiten Öffentlichkeit vermehrt – zum Teil auch mit viel Leidenschaft – darüber diskutiert. Leider wird dabei oft mit einer lückenhaften Datenbasis operiert. Das Fraunhofer ISE stellt deshalb kontinuierlich aktuelle Daten und Fakten zur Photovoltaik auf seiner Website in allgemein verständlicher Form zur Verfügung. 2012 haben wir auch eine neue Studie »Stromgestehungskosten von erneuerbaren Energien« vorgelegt. In ihr wird deutlich, wie konkurrenzfähig die Erneuerbaren inzwischen geworden sind. Durch Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen sind die Stromgestehungskosten der Photovoltaik auch in Deutschland mittlerweile unterhalb des Endkundenstrompreises gesunken.

Auch strukturell hat das Fraunhofer ISE weitere Schritte unternommen, die Energiewende optimal zu begleiten. Mit einem neuen Marktbereich »Smart Energy Cities« richten wir uns an einer der großen, aktuellen Forschungsaufgaben aus. Zu diesem Zweck stand auch unsere jährliche internationale Konferenz »Solar Summit Freiburg – Highlights and Trends in Solar Energy« diesmal unter der Überschrift »The Future Sus-

tainable City«. Rund 300 Teilnehmer diskutierten am 18. und 19. Oktober 2012 im Freiburger Konzerthaus über eine nachhaltige Stadtentwicklung. Die Konferenz vermittelte zudem einen Überblick über den aktuellen Stand der Solarforschung.

Die Bedeutung geeigneter Speichermedien für die fluktuierenden Erträge aus erneuerbaren Energiequellen kann nicht überschätzt werden. So hat sich im Herbst der Bundesverband Energiespeicher (BVES) gegründet, für den ich die Rolle des Gründungspräsidenten übernommen habe. Der Verband hat sich zum Ziel gesetzt, die wachsende Branche der Energiespeicherunternehmen zu vernetzen und so die Marktentwicklung zu beschleunigen. Zudem war das Institut gemeinsam mit der Fraunhofer-Allianz Energie bei der erstmals 2012 veranstalteten Messe »Energy Storage« in Düsseldorf präsent. Um Synergien und Vernetzung geht es auch in der 2012 neugegründeten Fraunhofer-Allianz Batterien. Das Fraunhofer ISE – mittlerweile eines der führenden Institute, die an stationären und mobilen Batteriesystemen forschen – arbeitet aktiv in dieser Allianz mit.

Unsere Forschungen im Bereich Wasserstofftechnologie und Intelligente Energiesysteme können wir durch die Einweihung unserer neuen solaren Wasserstoff-Tankstelle entscheidend weiter bringen. Die öffentlich zugängliche Tankstelle dient uns aber nicht nur als Forschungsplattform, sie ist gleichzeitig ein wichtiger Eckstein im Wasserstoff-Tankstellennetz des Landes. Die angestrebte Transformation unseres Energiesystems benötigt Wasserstoff als Langzeitspeicher sowie als Kraftstoff in der Mobilität. Aus Sonnen- oder Windenergie erzeugter Strom kann in Elektrolyseuren der Tankstelle zu Wasserstoff umgewandelt werden, der in Brennstoffzellen betriebenen Elektrofahrzeugen bei Betankungszeiten von drei Minuten eine Reichweite von über 400 km erzielen kann.



Mit den 2012 neu hinzugekommenen Einrichtungen bauen wir die Kapazitäten des Instituts am Standort Freiburg weiter aus. 2013 planen wir Einweihung und Umzug unserer Forscher im Bereich Solarthermie, Angewandte Optik und Funktionale Oberflächen in ein neues Gebäude mit mehr Raum für Labore und Anlagen. Dies wird es uns ermöglichen, unsere Forschungen in diesen Themenbereichen auszuweiten. So trägt das Fraunhofer ISE seinen Teil dazu bei, in Freiburg das »Sustainable Energy Valley« zu schaffen. Ein Leuchtturmprojekt mit diesem Titel hat das Land Baden-Württemberg gemeinsam mit der Fraunhofer-Gesellschaft ausgerufen. Inhaltlich geht es um die nachhaltige Erzeugung und Nutzung von Energie und Ressourcen. Die Forschung dazu soll in Freiburg speziell gebündelt und gefördert werden. Dafür sind Gesamtinvestitionen von mehr als 80 Millionen Euro vorgesehen. Dr. Nils Schmid, Finanz- und Wirtschaftsminister von Baden-Württemberg, besuchte im November die fünf Fraunhofer-Institute in Freiburg und bestätigte die Unterstützung des Landes.

Die Fraunhofer-Institute in Freiburg zeigten ihrerseits ihre Verbundenheit mit dem Standort bei der 60-Jahr-Feier von Baden-Württemberg. Im Juni öffneten sie für einen Tag ihre Türen für die Öffentlichkeit und boten Instituts- und Laborführungen sowie Vorträge an. Am Fraunhofer ISE konnten interessierte Besucher sich einen Überblick über die Aktivitäten des Instituts verschaffen und sich besonders mit der neuen solaren Wasserstofftankstelle und Exponaten zu den Themen Farbstoffsolarzellen und Sorptionsmaterialien auseinandersetzen.

2011 hatte das Fraunhofer ISE sein 30jähriges Bestehen gefeiert. In diesem Jahr stand ein weiteres Jubiläum an: 1987 installierten Forscher des Fraunhofer ISE auf dem netzfern gelegenen Wandergasthof Rappenecker Hütte im Schwarz-

wald eine Photovoltaik-Hybridanlage. Sie wurde nicht nur eine praktische Lösung für Eigentümer und Pächter, sondern gleichzeitig auch eine Forschungsstation für netzferne Energieversorgungssysteme. Die Anlage wurde über die Jahre sukzessiv erweitert. 1990 kam ein Windrad hinzu, 2003 eine Brennstoffzelle, so dass der Einsatz der fossilen Komponente Dieselgenerator immer weiter reduziert werden konnte. 2012 feierte die Rappenecker Hütte darum nicht nur ihr 350jähriges Bestehen, sondern auch 25 Jahre erfolgreiche Photovoltaik-Geschichte.

Die Stromversorgung des Wandergasthofs mit erneuerbaren Energien zählt zu den Meilensteinen in der frühen Geschichte des Fraunhofer ISE. Das erfolgreiche Projekt ist uns ein Ansporn für die kommenden Jahre, in denen es darum gehen wird, die Transformation des Energiesystems durch unsere Forschungsaktivitäten konsequent voranzubringen.

Für die Unterstützung und Förderung, die wir dazu von Seiten unserer Kuratoren und Stipendienggeber, unserer Ansprechpartner in den Ministerien auf Bundes- und Länderebene sowie von den Projektträgern – ganz besonders von unseren Industriepartnern – erhalten, möchte ich mich ausdrücklich bedanken. Ohne diese vertrauensvolle Zusammenarbeit wäre es uns nicht möglich, uns mit unseren ganzen Kompetenzen und Ressourcen für die große gesamtgesellschaftliche Aufgabe der Energiewende stark zu machen.



# INHALTSVERZEICHNIS

- 8 Organisationsstruktur
  - 10 Das Institut im Profil
  - 12 Modellierung von Energiesystemen
  - 14 Smart Energy Cities
  - 16 Entwicklungsplanung für erneuerbare Energien in Ägypten
  - 18 FuE-Höhepunkte
  - 20 Ehrungen und Preise
  - 21 Kuratorium
- 
- 22 ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE UND GEBÄUDETECHNIK**
    - 26 Energy Dream Center – ein Nullenergiegebäude in Seoul
    - 27 Neue Komponenten für Wärmepumpen und Kälteanlagen
    - 28 Wärmepumpen im zukünftigen Stromnetz
    - 29 CASCADE – Energiemanagement für Flughäfen nach ISO 50001
    - 30 WUFI Plus Therm – Praxistaugliche Gebäude- und Anlagensimulation
    - 31 Energiemanagement von Gebäuden und Quartieren
    - 32 »Cost-Effective« – neue Solarthermie- und BIPV-Fassadenkomponenten
    - 34 Solare Kühlung – neue Entwicklungen und Systemanalyse
    - 36 Effiziente Wärmeübertragung durch metallische Gewebestrukturen
    - 37 Indirekte sorptive Beschichtungen von Wärmeübertragerstrukturen
  
  - 38 ANGEWANDTE OPTIK UND FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN**
    - 42 Geordnete metallische Nanopartikel für plasmonische Effekte
    - 44 Entwicklung von robusten Materialien für photochrome Fenster
    - 45 Sekundäroptik-Charakterisierung für die konzentrierende Photovoltaik

**46 SOLARTHERMIE**

- 50** Monitoring und Optimierung von SolarAktivHäusern
- 51** Untersuchungen von Wind- und Schneelasten an Kollektoren
- 52** Vermessung von Luftkollektoren ohne transparente Abdeckung
- 53** Optimierung eines PV-thermischen Hybrid-Kollektors
- 54** Betrieb von Membrandestillation mit Nieder-temperaturwärmequellen
- 55** Vermessung von konzentrierenden nachgeführten Kollektoren
- 56** Beschleunigte Alterungstests für solarthermische Kollektoren
- 57** Markt und Systemtechnik für solare Prozesswärme in Indien
- 58** Bewertung von Parabolrinnen-Kraftwerken mit Salzschnmelze-Kreislauf
- 59** Optimierung der Frischdampfparameter in einem linearen Fresnelkraftwerk

**60 SILICIUM-PHOTOVOLTAIK**

- 64** Siliciumwaferherstellung mit diamantbesetztem Sägedraht
- 65** Herstellung monokristalliner p- und n-Typ Ingots mit Czochralski-Verfahren
- 66** Kristallisation von 250 kg Silicium-Blöcken – Optimierung des Gasstroms
- 67** Blocksilicium hoher Reinheit für hocheffiziente Solarzellen

- 68** Entwicklung slurrybasierter Drahtsägeprozesse für dünne Wafer
- 69** ProConCVD – kostengünstige Siliciumepitaxie für die Photovoltaik
- 70** Solarzellen mit rückseitigem amorphem Silicium-Heteroemitter
- 72** Einfluss von Präzipitatverteilungen auf die Siliciummaterialqualität
- 73** Charakterisierung auf Basis zeitmodulierter Lumineszenz
- 74** Druck-Galvanik Hybridkontakte mit kostengünstigen Materialien
- 76** Schnelle Inline ALD Abscheidung von Aluminiumoxid
- 77** Ionenimplantation für die Photovoltaik
- 78** Maßgeschneiderte Dotierstrukturen für Rückseitenkontaktzellen
- 80** Simultane Co-Diffusionsprozesse für n-Typ Solarzellen
- 81** Neuartige Druckverfahren für industrielle Siliciumsolarzellen
- 82** Messtechnik für die Silicium-Dünnschichttechnologie
- 83** Multifunktionale O<sub>3</sub>-basierte Reinigungen für Solarzellen
- 84** Antireflex- und Passivierungsschichten aus Plasmaabscheidungen
- 85** Optische Simulation passivierter Solarzellen mit rauer Rückseite
- 86** PL-basierte Qualitätskontrolle von quasi-mono Wafern
- 87** Laserdiffusion für Solarzellen aus kristallinem Silicium

### 88 PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND SYSTEME

- 92 Rückkontakt-Modultechnologie mit strukturierten Zellverbindern
- 93 Zuverlässigkeit von Zellmetallisierungen im PV-Modulbau
- 94 Prüfung von Anti-Soiling Schichten auf Verglasungsmaterialien
- 95 Potentialinduzierte Degradation im Indoor- und Outdoorversuch
- 96 Elektrolumineszenz-Tests an PV-Modulen
- 97 »Energy Rating« – Neue Bewertungskriterien für PV-Module

### 98 ALTERNATIVE PHOTOVOLTAIK- TECHNOLOGIEN

- 102 Optimierung punktfokussierender Konzentratormodule
- 103 Multi-Quantenwell Solarzellen für den Weltraum
- 104 Entwicklung und Charakterisierung von Konzentratorsolarzellen
- 105 Zweidimensionale Modellierung organischer Solarzellen
- 106 Produktentwicklung von Farbstoffsolarmodulen
- 107 Nano-Strukturen für ein effizientes Photonenmanagement

### 108 REGENERATIVE STROMVERSORGUNG

- 112 Feldtest mit PV-betriebenen Umkehrosmoseanlagen (PV-RO)
- 113 Optimierte Ladezustandsbestimmung für Bleibatterien
- 114 Innovative Systemtechnik für Dorfstromversorgungen von morgen
- 116 Qualitätssicherung von PV-Leuchten: Neue Batterie-Testmethoden
- 117 Hocheffiziente Leistungselektronik im Megahertzbereich
- 118 Brandgefahren, Brandschutz und Brandvermeidung in PV-Anlagen
- 119 Vorhersagebasierte Betriebsführungsstrategien im Smart Grid
- 120 Konzepte und Feldversuche für Elektrofahrzeuge im Smart Grid
- 121 Potenzialstudie zu Elektroautos in der CarSharing-Flotte

### 122 WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

- 126 Wassermanagement in Polymer-Elektrolyt-Membran-Brennstoffzellen
- 128 Chemische Beständigkeit von Brennstoffzellensystemkomponenten
- 129 Dynamische Modellierung eines Power-to-Gas Energiespeichersystems
- 130 Recycling von H<sub>2</sub>, SiCl<sub>4</sub> und HCl bei Si-CVD-Prozessen
- 131 Inbetriebnahme einer solar gestützten 700 bar-Wasserstoff-Tankstelle
- 132 Nanostrukturierte Elektroden zur effizienten H<sub>2</sub>-Produktion
- 133 Betriebserfahrungen mit Brennstoffzellenfahrzeugen

**134 SERVICEBEREICHE**

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

**148 ANHANG**

- 148** Gastwissenschaftler
- 149** Kongresse, Tagungen und Seminare
- 150** Promotionen
- 151** Nachwuchsförderung
- 152** Erteilte Patente
- 154** Vorlesungen und Seminare
- 156** Bücher
- 157** Reviewed Journals (Veröffentlichungen)
- 164** Eingeladene Vorträge



# ORGANISATIONSSTRUKTUR

Die Organisationsstruktur des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE basiert auf zwei parallel verlaufenden, sich wechselseitig ergänzenden Komponenten: den Geschäftsfeldern mit den Marktbereichen und den wissenschaftlichen Bereichen. Die Außendarstellung unseres Instituts, unsere Marketingaktivitäten im Bereich Forschung und Entwicklung (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 FuE in den Labors, die Projektarbeit und die konkrete Arbeitsorganisation entscheidend.

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

---

## INSTITUTSLEITUNG

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

## STELLVERTRETENDE INSTITUTSLEITUNG

Dr. Andreas Bett +49 761 4588-5257

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

---

<b>Thermische Anlagen und Gebäudetechnik</b>	Dr. Hans-Martin Henning	+49 761 4588-5134
<b>Solarthermie und Optik</b>	Dr. Werner Platzer	+49 761 4588-5983
<b>Materialien – Solarzellen und Technologie</b>	Dr. Andreas Bett	+49 761 4588-5257
<b>Solarzellen – Entwicklung und Charakterisierung</b>	Dr. Stefan Glunz	+49 761 4588-5191
<b>PV-Produktionstechnologie und Qualitätssicherung</b>	Dr. Ralf Preu	+49 761 4588-5260
<b>Photovoltaische Module, Systeme und Zuverlässigkeit</b>	Dr. Harry Wirth	+49 761 4588-5858
<b>Elektrische Energiesysteme</b>	Dr. Günther Ebert	+49 761 4588-5229
<b>Energietechnik</b>	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. Das Fraunhofer ISE ist nach DIN EN ISO 9001:2008 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 Batterien, Bau, Energie, Nanotechnologie, Optic Surfaces und SysWasser
- Mitglied der Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität
- Mitglied im Fraunhofer-Themenverbund »Werkstoffe, Bauteile – (MATERIALS)«
- Mitglied der Morgenstadt-Initiative der Fraunhofer-Gesellschaft

## **Außenstandorte und Kooperationen**

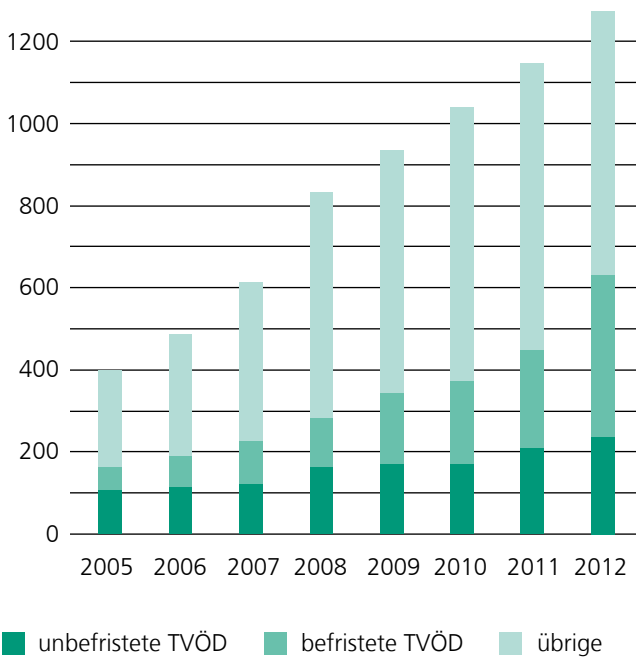
Das Labor- und Servicecenter LSC in Gelsenkirchen ist über die Landesgrenzen von NRW hinaus Partner für die Photovoltaik-Industrie. Solarzellenhersteller nutzen die Dienstleistung des LSC für die Qualitätskontrolle ihrer Produktion ebenso wie für kurzfristige Problemlösungen in der Prozesslinie. Das 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. 82).

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. 65).

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.

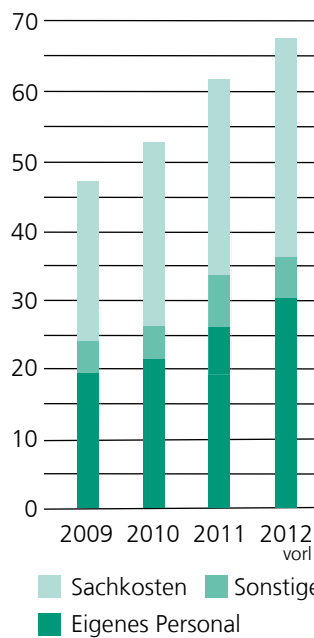
Das Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE in Boston trägt dazu bei, in Europa etabliertes Know-how und Technologien im Bereich erneuerbarer Energien für den amerikanischen Markt weiterzuentwickeln und dort einzuführen. 2010 startete das Fraunhofer CSE gemeinsam mit der Canadian Standards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

**Personal**

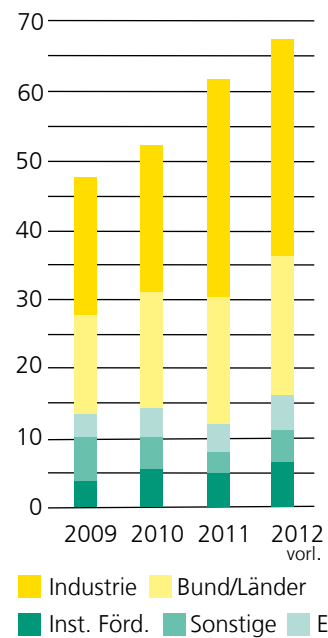


Am 31.12.2012 waren am Fraunhofer ISE insgesamt 1272 Mitarbeiter beschäftigt. Davon unterstützen 170 Promovierende, 156 Diplomanden, 38 Praktikanten, 13 Auszubildende, 290 wissenschaftliche Hilfskräfte sowie weitere 108 Mitarbeiter (z. B. Gastwissenschaftler) die Arbeit in den Forschungsprojekten und 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 66,3 Millionen Euro. Zusätzlich zu den in der Grafik angegebenen Ausgaben tätigte das Fraunhofer ISE im Jahr 2012 Investitionen in Höhe von 10,2 Millionen Euro (ohne Bauinvestitionen und Konjunkturprogramme).



# MODELLIERUNG VON ENERGIESYSTEMEN

Die zunehmende Nutzung erneuerbarer Energien auf unterschiedlichsten Ebenen – von der Solaranlage im Einzelgebäude bis hin zum großen Windpark im Meer – bedingt eine zunehmende Komplexität unseres Energiesystems. Neuen Komponenten, z. B. Speichern, kommt eine zentrale Rolle zu, um zeitliche Verschiebungen zwischen Erzeugung und Verbrauch auf unterschiedlichen Zeitskalen auszugleichen. Neue Konzepte für die Betriebsführung sind ebenso notwendig wie die Entwicklung neuer Geschäftsmodelle, um die politischen Ziele einer ambitionierten Reduktion von energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen möglichst schnell, kostengünstig und unter Erhalt einer hohen Versorgungssicherheit zu gewährleisten. Am Fraunhofer ISE haben wir im vergangenen Jahr umfangreiche Arbeiten zur Modellierung von komplexen Energiesystemen begonnen, mit dem Ziel, Dienstleistungen für unterschiedlichste Akteure aus Politik und Wirtschaft anzubieten.

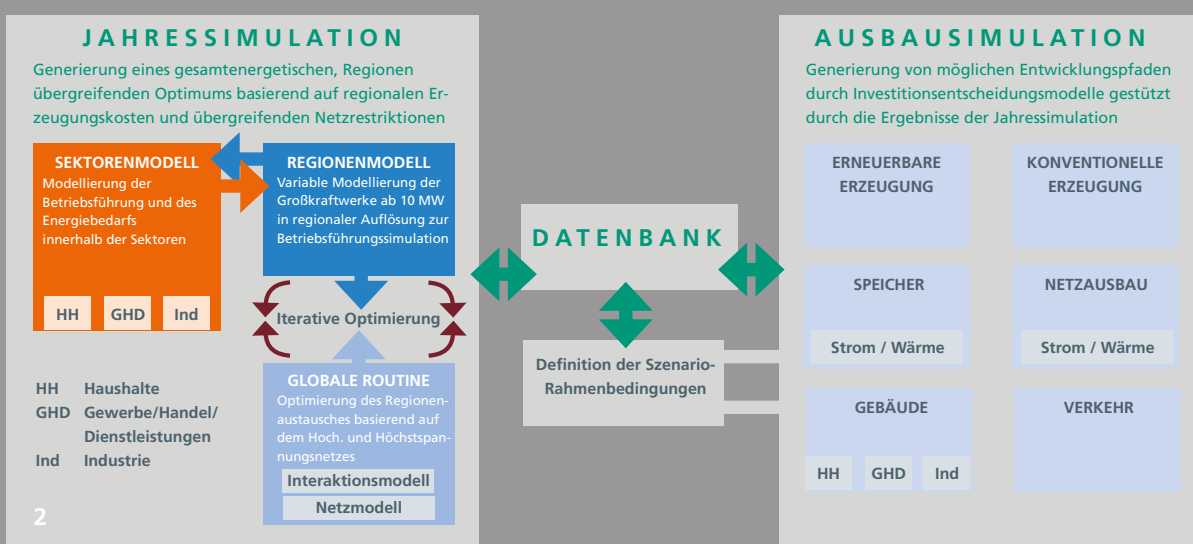
Jörg Dengler, Jan-Bleicke Eggers, Mehmet Elci, Sebastian Herkel, Christoph Kost, Niklas Kreifels, Andreas Palzer, Thomas Schlegl, Charlotte Senkpiel, Gerhard Stryi-Hipp, Christof Wittwer, **Hans-Martin Henning**

Um die unterschiedlichen Anforderungen zur modellhaften Abbildung komplexer Energiesysteme adäquat zu adressieren, haben wir drei unterschiedliche neue Modellansätze gewählt, die sich gegenseitig ergänzen und die unsere seit vielen Jahren umfangreich etablierten Simulationsmodelle für Solaranlagen, Gebäude und Quartiere abrunden.

Das Modell REMod-D (Regenerative Energien Modell Deutschland) beschreibt das Zielsystem einer Versorgung des Strom- und Wärmesektors in Deutschland mit einem sehr hohen Anteil erneuerbarer Energien bis hin zu 100 %. Bei dem Verfahren handelt es sich um ein Optimierungsprogramm, das den Mix aus Erzeugern, Wandlern und Speichern ermittelt, der zu minimalen jährlichen Gesamtkosten zum Betrieb und Erhalt des Energiesystems führt. Um das Wechselspiel zwischen Erzeugung, Speicherung und Verbrauch korrekt abzubilden, wird das gesamte System auf Basis von stündlichen Energiebilanzen für ein vollständiges Jahr simuliert. Das Besondere an unserem Modellierungsansatz im Vergleich zu ähnlichen existierenden Modellen ist, dass sowohl Strom- als auch

Wärmeversorgung im Modell gesamthaft und in ihrer Wechselwirkung abgebildet werden und dass auch die energetische Gebäudesanierung als Maßnahme zur Senkung des Wärmebedarfs mit in die Optimierung einbezogen wird. Abb. 3 zeigt die installierten Größen der wichtigsten Komponenten von drei Zielsystemen, die sich insbesondere im Umfang der energetischen Sanierung des Gebäudebestands und daraus resultierend in der zu installierenden Leistung von Wandlern erneuerbarer Energien unterscheiden.

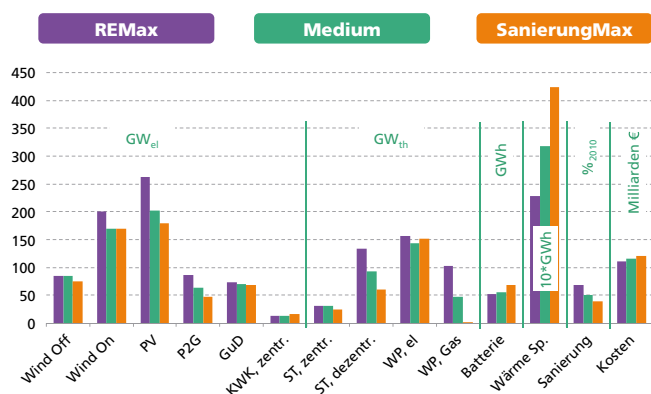
Das Modell E2S bildet das Energiesystem Deutschlands ausgehend von den heute existierenden Strukturen auf einer räumlich stark disaggregierten Ebene der Stadt- und Landkreise ab. Eine Jahressimulation dieses umfänglichen Systems erlaubt die detaillierte Untersuchung von Energieflüssen von Erzeugern und Verbrauchern auf Basis von Viertelstunden-Mittelwerten. In einer parallel ablaufenden Ausbausimulation wird die Entwicklung des Energiesystems unter gesetzten Rahmenbedingungen abgebildet, indem Investitionsentscheidungsmodelle für wichtige Akteure wie Energieversorger und Stadtwerke



- 1 *Strom aus Sonne und Wind ist ein wesentlicher Baustein der künftigen Stromversorgung (links). Die Gebäudesanierung trägt wesentlich zur Effizienz bei. In Freiburg wurde ein 16stöckiges Hochhaus zum Passivhaus saniert (Mitte). Solare Prozesswärme hat ein enormes Potenzial in der industriellen Anwendung (rechts).*
- 2 *Zusammenspiel der Jahres- und Ausbausimulation im E2S-Modell.*

aber auch Gebäudebesitzer modelliert werden. Daraus ergeben sich Änderungen sowohl in der Versorgungs- als auch in der Verbrauchsstruktur, da z. B. die Sanierung von Gebäuden zu niedrigeren Wärmeverbräuchen und eine verstärkte Nutzung von Wärmepumpen zu steigenden Stromverbräuchen führen. Durch die Interaktion von Jahres- und Ausbausimulation werden Rückschlüsse gezogen, welche Auswirkungen entsprechende politische Rahmenbedingungen bewirken und wie diese gegebenenfalls geändert werden müssten, um ein bestimmtes Ziel zu erreichen. Demnach ist das Programm sowohl für politische Entscheidungsträger als auch für Versorger und Kraftwerksbetreiber interessant, die Aufschlüsse über regional aufgelöste Strom- und Wärmeflüsse und Volllaststunden bei unterschiedlichen Erzeugungsstrukturen, entsprechendem Marktdesign und gewählten Betriebsführungsstrategien erlangen. Hersteller von einzelnen Komponenten und Technologien haben Interesse an der modellhaften Abbildung des Energiesystems mit konkreten Rückschlüssen über den Einsatz der unterschiedlichen Technologien, deren Verhalten im System virtuell getestet werden kann. Abb. 2 zeigt schematisch das Zusammenspiel von Jahressimulation und Ausbausimulation.

Viele Städte und Gemeinden in Deutschland haben sich ambitionierte Ziele gesetzt, was die Reduktion ihrer CO<sub>2</sub>-Emissionen und den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien zur kommunalen Energieversorgung betrifft. Die Kommunen stehen nun vor der Herausforderung, aus den vielen sinnvollen Einzelmaßnahmen, z. B. Kraft-Wärme-Kopplung, Nahwärmenetze, Photovoltaik, Solarthermie, Gebäudesanierung und Wärmepumpen ein Gesamtkonzept zu entwickeln, das den größten Nutzen zu möglichst geringen Kosten ermöglicht. Eine fundierte Entscheidung kann hierbei nur getroffen werden, wenn die Wechselwirkungen der Einzelmaßnahmen analysiert und bewertet werden und am Ende quantitative



- 3 *Installierte Leistung bzw. Größe wichtiger Komponenten von drei Systemen, die alle zu einer Vollversorgung Deutschlands mit erneuerbaren Energien im Strom- und Wärmesektor führen.*

Ergebnisse für die möglichen Energiesystemvarianten vorliegen. Diesen Bereich adressiert das dritte Energiesystemmodell KomMod (Kommunales Energiesystemmodell). Es erfasst alle drei Bedarfssektoren Strom, Wärme und zukünftig auch Verkehr zeitlich und räumlich hochaufgelöst sowie technisch und ökonomisch detailliert und erlaubt damit Aussagen über die Möglichkeiten der Energiebedarfsdeckung bis hinunter auf die Quartiersebene einer Siedlung. Als Optimierungsmodell wird KomMod künftig über die reine Analyse eines heutigen oder zukünftigen Ist-Zustands hinaus auch optimierte zukünftige kommunale Energiesystemvarianten ermitteln und ein wichtiges Instrument zur Beratung von Kommunen darstellen.



© FWTM/Green City Freiburg

# SMART ENERGY CITIES

Städte und Kommunen sind Schlüsselakteure bei der Transformation des Energiesystems, da sie für 75 Prozent des Energiebedarfs verantwortlich sind. Viele Transformationsmaßnahmen werden vor allem lokal realisiert werden, z. B. die energetische Gebäudesanierung, Smart Grids, Nahwärmenetze, Strom- und Wärmespeicher und multimodale Verkehrssysteme. Vor Ort findet auch die Kommunikation mit den Bürgerinnen und Bürgern statt, deren Akzeptanz und Unterstützung erforderlich ist. Global nehmen immer mehr Städte und Kommunen diese Herausforderungen an und der Bedarf an der Erforschung entsprechender Konzepte nimmt deutlich zu. In Deutschland sieht die Hightech-Strategie der Bundesregierung eine Intensivierung der Forschung im Zukunftsprojekt »CO<sub>2</sub>-freie, energieeffiziente und klimaangepasste Stadt« vor.

Arnulf Dinkel, Sebastian Gözl, Sebastian Herkel, Dominik Noeren, **Gerhard Stryi-Hipp**, Christof Wittwer, Günter Ebert, Hans-Martin Henning

Das Fraunhofer ISE erforscht und entwickelt Technologien für eine nachhaltige Energieversorgung. Aufgrund der steigenden Marktanteile der erneuerbaren Energien gewinnt nun zusätzlich zur Komponentenentwicklung die Entwicklung von komplexen Energiesystemen an Bedeutung, wie sie z. B. kommunale Energiesysteme darstellen, die ausschließlich erneuerbare Energien nutzen. Um Städte und Kommunen bei der Transformation ihrer Energiesysteme zu unterstützen, hat das Fraunhofer ISE den Marktbereich »Smart Energy Cities« eingerichtet. Dieser unterstützt und koordiniert die interdisziplinäre Zusammenarbeit der einzelnen Forschungsgruppen und die Kooperation mit externen Forschungsinstitutionen, z. B. aus dem Bereich der Ökonomie in Bezug auf stadtbezogene Forschungsthemen. Dabei kann das Fraunhofer ISE nicht nur auf umfangreiche technologische Forschungsstrukturen zurückgreifen, sondern auch auf ein sozialwissenschaftliches Forschungsteam, das sich mit Konzepten zur nachhaltigen Gestaltung und zur Akzeptanz neuer Technologien beschäftigt sowie neue Geschäfts- und Beteiligungsmodelle erarbeitet.

Auch für die Fraunhofer-Gesellschaft sind Technologien und Konzepte für nachhaltige Städte und Kommunen ein Arbeitsschwerpunkt. Unter dem Begriff »Morgenstadt – Stadt der Zukunft« kooperieren zwölf Fraunhofer-Institute in den Themenfeldern Energie, Gebäude, Mobilität, Sicherheit, Wasser, Produktion und Logistik, Informations- und Kommunikationstechnologie sowie Businessmodelle und Governance. Im Mai 2012 wurde gemeinsam mit der Industrie das Projekt »Morgenstadt: City Insights (m:ci)« gestartet. Multidisziplinäre Forschungsteams werden im Jahr 2013 sechs Städte weltweit besuchen und beforschen. In Tokyo, Singapur, New York, Kopenhagen, Berlin und Freiburg werden inspirierende Lösungsansätze für die Stadt der Zukunft erforscht und die Übertragbarkeit der innovativen Konzepte in andere Klimata und Länder untersucht.

Das Fraunhofer ISE leitet in m:ci das Teilprojekt Energie und kann dabei auf vielfältige Aktivitäten im Bereich nachhaltige Energieversorgung von Städten und Kommunen aufbauen.

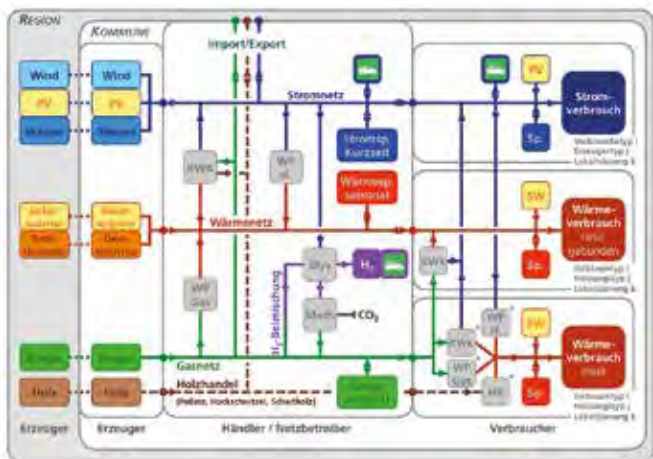


## 1 Modell der Green City Freiburg.

Beispielsweise wurden Projekte im Bereich intelligente Heizungssteuerung, effiziente Nahwärmeversorgung, Nullenergiegebäude, Passivhausstandard für Hochhäuser, Smart Grid-Technologien, Elektro- und Wasserstoffmobilität sowie Strom- und Wärmespeicher durchgeführt.

Nachhaltige Energiesysteme, die mehrheitlich oder vollständig auf erneuerbaren Energien beruhen, müssen auf jede Kommune angepasst werden, da sie das lokale und regionale Angebot an erneuerbaren Energien berücksichtigen und dieses mit dem prognostizierten kommunalen Verbrauchsprofil in Deckung bringen müssen. Um eine hohe Versorgungssicherheit bei minimalen Kosten zu gewährleisten, muss auf Basis von zeitlich aufgelösten dynamischen Jahressimulationen ein für die jeweilige Kommune optimaler Energiemix verbunden mit geeigneten Netzstrukturen und Betriebsmitteln ermittelt werden. Um Städten und Kommunen entsprechende Dienstleistungen anbieten zu können, werden am Fraunhofer ISE mehrere Simulationswerkzeuge zur Bewertung der Transformationsoptionen entwickelt und eingesetzt. Darüber hinaus werden Methoden zur Erarbeitung robuster Umsetzungspfade zur Erreichung der Zielszenarien entwickelt.

Die Weiterentwicklung der existierenden kommunalen Energiesysteme wird unterstützt durch Werkzeuge und Konzepte zur Optimierung der Betriebsführung vor dem Hintergrund des liberalisierten Energiemarkts und der regulativen Rahmenbedingungen. Zur Erfolgskontrolle wird eine wissenschaftliche Begleitung der Transformationsprozesse auf Basis von langjährigen Monitoring angeboten.



## 2 Kommunales Energiesystem auf Basis Erneuerbarer Energien.

( $WP_{el}/Gas$  = Wärmepumpe elektrisch/Gas betrieben,  
 KWK = Kraft-Wärme-Kopplung, HK = Holzkessel, Sp. = Speicher,  
 SW = Solarwärme, Elys = Elektrolyseur, Meth = Methanisierung,  
 \* ein Wärmeerzeuger pro Gebäude)



# ENTWICKLUNGSPLANUNG FÜR ERNEUERBARE ENERGIE IN ÄGYPTEN

Der Nahe Osten und Nordafrika (MENA-Region) bieten gewaltige und bisher wenig genutzte Solar- und Windressourcen. Gleichzeitig sinken in diesen Regionen die verfügbaren fossilen Ressourcen in Form von Erdgas und Erdöl stark. Daher haben mehrere MENA-Staaten Pläne für den Ausbau der erneuerbaren Energien angekündigt. Dadurch können der eigene Verbrauch nachhaltiger gedeckt und die verbleibenden fossilen Ressourcen für den Export verwendet werden. Die zusammen mit dem Fraunhofer ISI gegründete Arbeitsgruppe Renewable Energy Innovation Policy (RENIP) unterstützt Kunden aus Wirtschaft und öffentlicher Hand bei der Entwicklung von Ausbaustrategien und berät im Hinblick auf Förderstrategien für erneuerbare Energien. Derzeit arbeiten wir u.a. an einem Entwicklungsplan für erneuerbare Energien in Ägypten.

**Verena Jülch**, Christoph Kost, Noha Saad, Jessica Thomsen, Thomas Schlegl

Im Projekt »Combined Renewable Energy Master Plan for Egypt« (CREMP) arbeitet RENIP zusammen mit Mitarbeitern des Bereichs »Solarthermie« und Lahmeyer International, Engineering and Consulting Services. Gemeinsam erstellen wir einen Entwicklungsplan für erneuerbare Energien in Ägypten und führen eine Machbarkeitsstudie für ein CSP-Kraftwerk durch. Der Entwicklungsplan setzt sich aus folgenden Bausteinen zusammen:

- Analyse des techno-ökonomischen Potenzials von Wind- und Solarenergie
- Integrationsmöglichkeiten erneuerbarer Energien in die lokale Stromversorgung
- Untersuchung und Bewertung politischer Anreizsysteme für die Installation von Kraftwerken und die Erschließung lokaler Wertschöpfungspotenziale
- Analyse der Finanzierungsmöglichkeiten zur Bereitstellung der benötigten Rahmenbedingungen

Für eine Analyse der lokalen Industriepotenziale entlang der Wertschöpfungsketten der erneuerbaren Energietechnologien Photovoltaik (PV), Concentrated Solar Power (CSP) und Wind in Ägypten hat RENIP 39 Interviews mit Vertretern unterschiedlicher Unternehmen geführt. Anhand der Interviewergebnisse wurde das lokale Wertschöpfungspotenzial für PV, CSP und Wind ermittelt (Abb. 3/4) und für bestehende Projekte die derzeit erreichte lokale Wertschöpfung analysiert. Auf dieser Basis haben wir lokale Wertschöpfungspotenziale bestimmt, die in der Zukunft noch realisiert werden können. Ein weiterer Schwerpunkt unserer Arbeit lag in der Untersuchung von Maßnahmen zur Förderung von nationalen Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten im Bereich erneuerbare Energien. Hierbei wurden bestehende Maßnahmen evaluiert und mit den Entwicklungen in ausgewählten Beispielländern verglichen. Aus der Analyse konnten Schwachpunkte abgeleitet und Verbesserungsvorschläge erarbeitet werden. Die Ergebnisse fließen derzeit in die Entwicklung einer umfassenden Strategie für die Förderung erneuerbarer Energien in Ägypten ein.





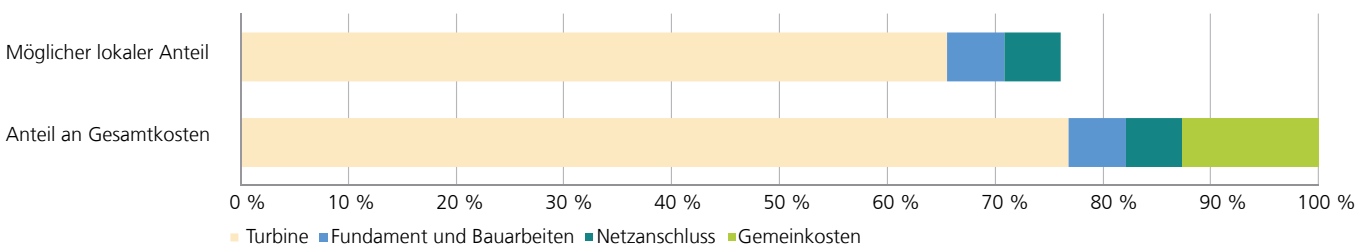
2

- 1 CSP-Kraftwerk in Kuraymat, 90 km südlich von Kairo, Ägypten: 140 MW Gesamtkapazität (Gas-Zuführung), 20 MW<sub>el</sub> Leistung des Solarfelds.
- 2 Windpark in Zafarana am Golf von Sues, Ägypten: 700 Anlagen mit 517 MW Gesamtkapazität.

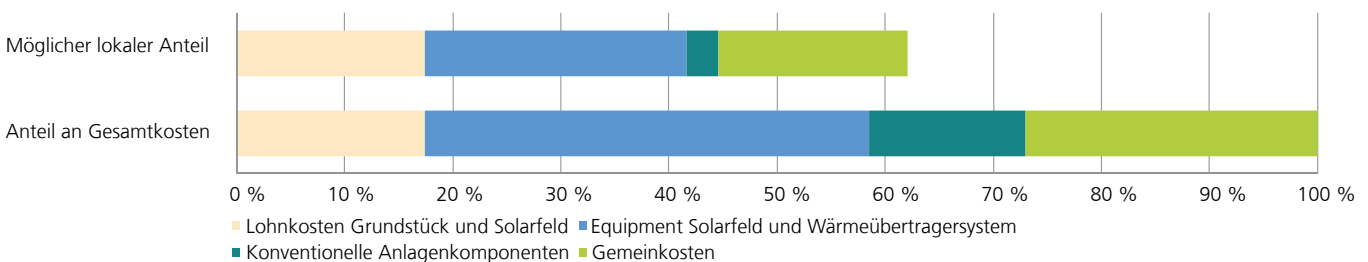
Die 2009 gebildete Kooperation »Renewable Energy Innovation Policy« (RENIP) bündelt die Kompetenzen der beiden Fraunhofer-Institute für Solare Energiesysteme ISE und für System- und Innovationsforschung ISI. Technologieentwicklung und angewandte Forschung des Fraunhofer ISE sowie ökonomische Systemanalyse und Innovationsforschung am Fraunhofer ISI ergänzen sich zu einem umfangreichen interdisziplinären Angebot. In der Kooperation unter der Leitung von Dr. Mario Ragwitz (Fraunhofer ISI) und Dr. Thomas Schlegel (Fraunhofer ISE) können z. B. Dienstleistungen angeboten werden, bei denen Technologien vom Anfangsstadium ihrer Entwicklung und Implementierung an auf ihr späteres Innovationspotenzial auf dem Energiemarkt untersucht und entsprechend gesteuert werden können.

Zu den bisher erarbeiteten Projekten zählt die Studie »MENA Assessment of Local Manufacturing Potential for Concentrated Solar Power (CSP) Projects«, beauftragt von der Weltbank. Sie gilt inzwischen als Standardwerk in den Bereichen Wertschöpfungspotenziale erneuerbarer Energien und Aktionspläne zu deren Erschließung in der MENA-Region. Aufbauend auf diese Arbeit unterstützt RENIP nun einzelne MENA-Staaten bei der Strategieentwicklung und berät bei der Entwicklung von Förderstrategien unter Berücksichtigung nationaler Rahmenbedingungen im Energiesektor.

[www.renip.fraunhofer.de](http://www.renip.fraunhofer.de)



### 3 Lokales Wertschöpfungspotenzial von Windkraftanlagen in Ägypten.



### 4 Lokales Wertschöpfungspotenzial von solarthermischen Kraftwerken in Ägypten.

# FuE-HÖHEPUNKTE

## ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE UND GEBÄUDETECHNIK

- neu entwickeltes, ganzheitliches Energiemodell für Deutschland: 100 % erneuerbare Energien für Strom und Wärme einschließlich energetischer Gebäudesanierung
- ab-initio-Modelle für gebäudeintegrierte Photovoltaik (BIPV) entwickelt und angewendet
- Entwicklung und Demonstration von fassadenintegrierten Lüftungssystemen für Neubau und Sanierung
- materialunabhängige Beschichtung von Sorptionsmaterialien auf Wärmeübertragern

## ANGEWANDTE OPTIK UND FUNKTIONALE OBERFLÄCHEN

- weltgrößtes hexagonales Beugungsgitter auf 1,2 x 1,2 m<sup>2</sup> nahtlos durch Interferenzlithographie hergestellt
- Erzeugung geordneter plasmonischer Metall-Nanopartikel auf großen Flächen durch Interferenzlithographie-, Nanoimprint- und Lift-Off-Prozesse

## SOLARTHERMIE

- Erweiterung der Simulationsumgebung ColSim für die Entwicklung von Reglern und Betriebsführung um Komponenten aus den Hochtemperaturanwendungen (z. B. Salzschmelze, Direktverdampfung, Speichermodelle)
- Nachweis der Rekristallisation von Salzschmelze im Schneckenwärmetauscher (10 kW Laborversion)
- Aufbau eines Prüfstands zur Untersuchung von mechanischen Wind- und Schneelasten auf Solarkollektoren
- Erarbeitung von Prüfverfahren für die normgerechte Vermessung von Luftkollektoren

## SILICIUM-PHOTOVOLTAIK

- erfolgreiche Silicium-Epitaxie in Hochdurchsatz-ProConCVD (Production Continuous Chemical Vapor Deposition)
- TCO-freie Silicium-Heterosolarzelle mit diffundierter Vorderseite und rückseitig sammelndem amorphem Silicium-Emitter mit einem Wirkungsgrad von 22,8 %
- Rückseitenkontakt-Solarzelle mit entkoppelter Geometrie der Diffusionen und der Metallisierung mit einem Wirkungsgrad von 23,0 %
- Herstellung einer n-Typ-Solarzelle mit Aluminium-Punktemittern mit einem Wirkungsgrad von 19,7 % unter Verwendung einer angepassten Prozesssequenz für p-Typ PERC-Solarzellen
- Herstellung einer Saatschicht-Tinte zur Kontaktierung von schwach dotierten Bor-Emittern mit einer Oberflächenkonzentration von  $1 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$
- Erweiterung des Klaasen-Mobilitätsmodells für Ladungsträger in kompensiertem Silicium
- mittels TOPAS (Thermal Oxide Passivated All Sides)-Prozessfolge 20,0 % Solarzellenwirkungsgrad auf großen Industriestrukturen (mCz, 156 mm Kantenlänge) sowie 19,7 % auf quasi-mono Silicium
- großflächige HIP-MWT-Solarzellen (p-typ Cz-Silicium) mit schablonengedruckter Vorderseite und 20,2 % Wirkungsgrad
- kostengünstiger einstufiger ozonbasierter Reinigungsprozess als Ersatz für bislang aufwändige RCA-Reinigung in Herstellungsabläufe integriert und mittels industrieller Anlagentechnologie erfolgreich getestet
- Hochleistungsplasmaabscheidungsanlage zur industriellen Herstellung von Antireflex- und Passivierungsschichten erfolgreich gemeinsam mit Industriepartnern entwickelt
- Entwicklung eines Verfahrens zur tomographischen Rekonstruktion von Defekten in multikristallinen Si-Säulen basierend auf Photolumineszenzbildern an as-cut Wafern
- Herstellung von modulintegrierbaren großflächigen p-Typ mc-Si Al-BSF Solarzellen aus 100 % UMG-Silicium Feedstock mit über 17,0 % Wirkungsgrad

## PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND SYSTEME

- Genauigkeit bei der Präzisionsmessung von Solarmodulen gesteigert, jetzt weltweit einmalige Messabweichung von nur 1,8 Prozent (CalLab PV Modules)
- 16zelliger Moduldemonstrator mit MWT-Zellen aus dem PV-TEC des Fraunhofer ISE entwickelt, durch optimierte Verbindungs- und Einkapselungstechnologie Leistungsverlust kleiner 1 % von Zelle zu Modul erreicht, bezogen auf die Aperturfläche (Modul-Technologiecenter MTC)

## ALTERNATIVE PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIEN

- Rekordmodule mit 32,1 % Wirkungsgrad (outdoor gemessen)
- erste GaInP/GaAs-Tandemzelle direkt auf Silicium gewachsen mit 16 % Wirkungsgrad
- erste Si-Quantenpunkt-Solarzelle realisiert mit 370 mV Spannung
- ITO-freie organische Solarzelle mit 6 % Wirkungsgrad
- Inbetriebnahme der Rolle-zu-Rolle Beschichtungsanlage für organische Solarzellen

## REGENERATIVE STROMVERSORGUNG

- Felderprobungsphase der intelligenten Ladeinfrastruktur des Flottenversuchs Elektromobilität (BMU) erfolgreich beendet
- Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Qualitätsbeurteilung von Batterien und PV-Leuchten
- hochpräzise Lade- und Alterungszustandsbestimmung bei Lithium-Eisen-Phosphat-Batterien
- kompakter Gleichspannungswandler mit GaN-Transistoren und 1 MHz Schaltfrequenz
- Seit 25 Jahren PV-Inselsystem auf dem Rappenecker Hof erfolgreich in Betrieb

## WASSERSTOFFTECHNOLOGIE

- 50 kW-Biomasse-Vergaser produziert für mehr als 600 Stunden ein teerfreies ( $< 50 \text{ mg / Nm}^3$ ) Synthesegas und demonstriert damit die technische Reife des neuen Fraunhofer ISE-Vergasungsverfahrens
- erfolgreiches Upscaling der Zellfläche einer Redox-Flow-Batterie von 700 cm<sup>2</sup> auf über 2000 cm<sup>2</sup> für Stacks mit einer Leistung von 5 kW
- vier selbst entwickelte, außentaugliche Teststände zur parallelen Charakterisierung von 30 Test-Brennstoffzellen wurden über 6000 Stunden im Feld betrieben
- Eröffnung einer öffentlich zugänglichen solaren Wasserstoff-Tankstelle zur 700 bar-Schnellbefüllung gemäß SAE J2601



© Foto: Peter Himsel; Quelle: Archiv/DBU

# EHRUNGEN UND PREISE

Beim 27. Symposium Photovoltaische Sonnenergie (29.2.–2.3.2012) im Kloster Banz in Bad Staffelstein gewannen **Sönke Rogalla** und **Sebastian Blume** mit den Co-Autoren **Bruno Burger**, **Stefan Reichert** und **Christoph Siedle** den 1. Preis für ihren Posterbeitrag. In diesem stellten sie einen verbesserten Ansatz zur Bestimmung der Oberschwingungsemissionen von Wechselrichtern vor.

**Harry Kummer** wurde für die Entwicklung eines Beschichtungssystems für Wärmetauscher im Rahmen seiner Diplomarbeit der 2. Hugo-Geiger-Preis verliehen. Mit der Auszeichnung würdigt das Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Infrastruktur, Verkehr und Technologie hervorragende anwendungsorientierte Diplom- oder Masterarbeiten. Die diesjährige Verleihung fand am 8.5.2012 auf der Fraunhofer-Jahrestagung in Stuttgart statt.

Ebenfalls im Kloster Banz in Bad Staffelstein fand vom 9.–11.5.2012 das 22. Symposium Thermische Solarenergie statt. Gemeinsam mit den Co-Autoren Frank Steinbach, Jörg Witulski und A. Erman Tekkaya des Instituts für Umformtechnik und Leichtbau (IUL) der TU Dortmund belegten **Lotta Koch** und **Dr. Michael Hermann** den 2. Platz mit ihrem Poster über die Erfahrungen und Ergebnisse aus der Entwicklung von Stahlabsorbbern.

Auf der Metallographietagung in Rostock (19.–21.9.2012) kürten die Juroren aus dem wissenschaftlichen Beirat der Fachzeitschrift »Praktische Metallographie« die drei besten Aufsätze des vergangenen Jahrs mit dem Buehler Best Paper Award. Zusammen mit Patrik Voos (ITW Test & Measurement GmbH, Düsseldorf) belegten **Dirk Eberlein**

1 *Preisgekrönte Konzentradorphotovoltaik: Dr. Andreas Bett (links) und Hansjörg Lerchenmüller (rechts), Soitec Solar, wurde der Deutsche Umweltpreis 2012 verliehen.*

und **Peter Schmitt** mit ihrer gemeinsamen Veröffentlichung »Metallographische Probenpräparation von verlöteten Solarzellen« den 1. Platz bei der diesjährigen Preisverleihung.

Aufsehen erregte die Verleihung des Deutschen Umweltpreises an **Dr. Andreas Bett** und **Hansjörg Lerchenmüller** von Soitec Solar, die beide für ihre Verdienste um die Entwicklung, Markteinführung und Kommerzialisierung der Konzentradorphotovoltaik geehrt wurden (Abb. 1). »Bett und Lerchenmüller haben zum Nutzen der Sonnenenergie Außerordentliches geleistet, indem sie eine neue solare Technologie zur Marktreife entwickelt haben«, so Dr. Fritz Brickwedde, Generalsekretär der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU). Konzentradorphotovoltaik wird in großen Kraftwerken in sonnenreichen Ländern zur Gewinnung von Strom aus Sonnenenergie eingesetzt. Was im kleinen Maßstab im Forschungslabor begann, trägt heute in industriellem Maßstab zur Umsetzung der Energiewende bei. Dafür werden in großen Kraftwerken tausende industriell gefertigter Konzentratormodule der Sonne nachgeführt. In jedem Modul bündeln Linsen das Sonnenlicht fünfhundertfach. Kleinste mehrschichtige Solarzellen aus Halbleitermaterialien verwandeln das gesammelte Sonnenlicht effizient in Strom. Weiterer Preisträger 2012 ist Günther Cramer, Mitbegründer und Aufsichtsrat der SMA Solar Technology AG. Der Deutsche Umweltpreis wurde durch Bundespräsident Joachim Gauck am 28.10.2012 in Leipzig überreicht.

# KURATORIUM

## VORSITZENDER

**Dr. Carsten Voigtländer**

Vaillant GmbH, Remscheid

## STELLVERTRETENDER VORSITZENDER

**Dr. Hubert Aulich**

PV Crystalox Solar GmbH, Erfurt

---

## MITGLIEDER

**Dr. Nikolaus Benz**

Schott Solar CSP GmbH, Mainz

**Dr. Klaus Bonhoff**

Now GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff  
und Brennstoffzellentechnologie, Berlin

**Regierungsdirektorin Kerstin Deller**

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

**Hans-Josef Fell**

Mitglied des Deutschen Bundestags, Berlin

**Ministerialrat Stefan Gloger**

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

**Dr. Winfried Hoffmann**

Berater Applied Solar Expertise  
President EPIA, Brüssel

**Dipl.-Ing. Helmut Jäger**

Solvis GmbH & Co. KG, Braunschweig

**Dipl.-Ing. Wilfried Jäger**

VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Offenbach

**Ministerialrat Dr. Knut Kübler**

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi),  
Bonn

**Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus**

Ministerium für Finanzen und Wirtschaft,  
Baden-Württemberg, Stuttgart

**Dr. Ralf Lüdemann**

SCHMID Group, Freudenstadt

**Klaus-Peter Pischke**

Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt

**Dr. Klaus-Dieter Rasch**

AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn

**Dr. Dietmar Roth**

Classic Centrum Zwickau AG, Zwickau

**Prof. Dr. Frithjof Staiß**

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

**Prof. Andreas Wagner**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Das Kuratorium begutachtet die Forschungsprojekte und berät die Institutsleitung und den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft bezüglich des Arbeitsprogramms des Fraunhofer ISE (Stand: 28.11.2012).



# EFFIZIENTES BAUEN MIT DER SONNE



# ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE UND GEBÄUDETECHNIK

Gebäude sind heute Energieverbraucher und für rund 40 % des Endenergieverbrauchs in Deutschland verantwortlich. 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 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 Pilotobjekte.

Das Europäische Parlament hat aber einen Gesetzesvorschlag formuliert, der vorsieht, dass ab 2018 neue öffentliche Gebäude und ab 2020 sämtliche Neubauten einen Nahe-Nullenergie-Standard erfüllen – also über das Jahr eine nahezu neutrale oder gar positive Energiebilanz aufweisen müssen. 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. Daneben gilt es, Konzepte zu entwickeln, die eine möglichst geringe Belastung der Stromnetze bedingen. Dieses Thema ist angesichts eines stark gestiegenen und weiter wachsenden Anteils fluktuierender erneuerbarer Energien aus Sonne und Wind im Stromnetz von immenser Bedeutung. Die Entwicklung angepasster Regelungs- und Betriebsführungskonzepte ist deshalb ebenso ein wichtiges Arbeitsfeld wie die Entwicklung von neuen Speichertechnologien, die ein erhöhtes lokales

Lastmanagement ermöglichen. Mit unserem SmartEnergyLab können wir hier bei der Entwicklung leistungsfähiger Konzepte und Betriebsführungsstrategien unterstützen.

Für die Transformation des Energiesystems kommt der Sanierung des Gebäudebestands eine zentrale Rolle zu. Ein Weg, um Kostensenkungen für die energetische Sanierung zu erreichen, ist die Integration haustechnischer Funktionen in die Dämmebene. Neben der Möglichkeit einer Vorfertigung mit entsprechendem Kostensenkungspotenzial wird dadurch auch der Aufwand für bauliche Arbeiten im Innenraum reduziert. Hier konnten wir erste Konzepte zur Integration sowohl von Lüftungssystemen mit Wärmerückgewinnung als auch der Fenster in vorgefertigte Module zur Dämmung existierender Bauten entwickeln und erfolgreich demonstrieren.

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 Neubauten wie für die energetische Bestandssanierung 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 kontinuierlich weiter entwickeln, um auch innovative neue Lösungsansätze in die Konzeptentwicklung einzubringen. 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 Wärmespeicherfähigkeit 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 solcher Verfahren zur energieeffizienten Betriebsführung und Regelung sind deshalb ein wichtiges Arbeitsgebiet.

*Mit dem Energy Dream Center hat die Stadtregierung Seoul ein Zentrum für Erneuerbare Energien realisiert. Das Nullenergiegebäude widmet sich mit Ausstellungen und einem breiten Informationsangebot auf 3500 m<sup>2</sup> diesem Thema. Ein interdisziplinäres Team unter Leitung des Fraunhofer ISE hat das Energy Dream Center entworfen und den Bau begleitet. Im Dezember 2012 wurde das Leuchtturmprojekt offiziell eingeweiht (s. S. 26).*

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 Nutzerkomfort optimierte Konzepte zu verwirklichen. Dabei spielen gerade in städtischen Räumen Energiekonzepte, die über das Einzelgebäude hinausgehend Quartiere betrachten, eine wachsende Rolle, vor allem auch, wenn es um Netz gebundene Lösungsansätze geht. Hier haben wir den Fokus unserer Aktivitäten ausgedehnt und erste beispielgebende Vorhaben gemeinsam mit Energieversorgern und Wohnungsbaugesellschaften umgesetzt. Die internationalen Rahmenbedingungen für diese Ansätze entwickeln wir u. a. durch unsere Mitarbeit in Projekten der Internationalen Energieagentur IEA und der International Renewable Energy Agency IRENA.

## ANSPRECHPARTNER

---

<b>Fassaden und Fenster</b>	Dipl.-Phys. Tilmann Kuhn	Telefon +49 761 4588-5297 tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de
<b>Gebäudekonzepte, Analyse und Betrieb</b>	Dipl.-Ing. Sebastian Herkel	Telefon +49 761 4588-5117 sebastian.herkel@ise.fraunhofer.de
<b>Wärme- und Kältespeicher</b>	Dr. Peter Schossig	Telefon +49 761 4588-5130 peter.schossig@ise.fraunhofer.de
<b>Energieeffiziente und solare Kühlung</b>	Dr. Doreen Kalz	Telefon +49 761 4588-5403 doreen.kalz@ise.fraunhofer.de
<b>Energie-Versorgungsanlagen für Gebäude</b>	Dipl.-Ing. Sebastian Herkel	Telefon +49 761 4588-5117 sebastian.herkel@ise.fraunhofer.de
<b>Lichttechnik</b>	Dr.-Ing. Jan Wienold	Telefon +49 761 4588-5133 jan.wienold@ise.fraunhofer.de
<b>Gebäude-Integrierte Photovoltaik</b>	Dipl.-Phys. Tilmann Kuhn	Telefon +49 761 4588-5297 tilmann.kuhn@ise.fraunhofer.de



1



2

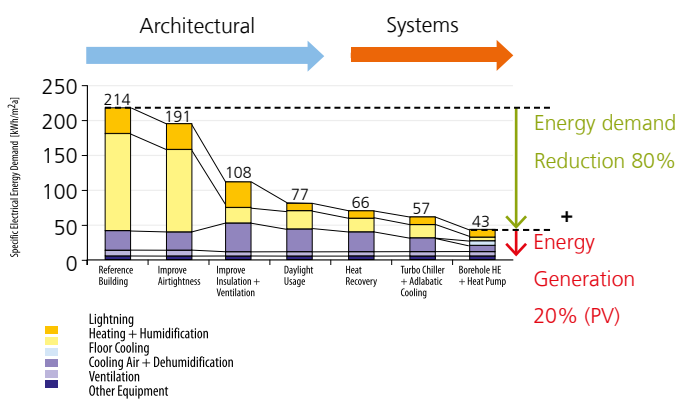
# ENERGY DREAM CENTER – EIN NULLENERGIE- GEBÄUDE IN SEOUL

Immer mehr Länder formulieren anspruchsvolle Energieeffizienzziele für Gebäude. Auch Korea hat Ziele formuliert, die in den nächsten Jahren umgesetzt werden sollen. Das Energy Dream Center in Seoul ist ein Vorzeigeprojekt für die Umsetzung neuester Techniken und die Nutzung erneuerbarer Energien. Dabei wurde ein Nullenergiestandard angestrebt, der sich durch eine jährlich ausgeglichene Bilanz bezogen auf die Primärenergie auszeichnet. Erneuerbare Energien werden direkt am Gebäude oder in unmittelbarer Umgebung genutzt. Das Gebäude wurde mit einem ganzheitlichen Planungs- und Realisierungsansatz sowie mit neuesten technischen Systemen umgesetzt.

**Arnulf Dinkel**, Sebastian Herkel, Jan Wienold, Hans-Martin Henning

1 Das Energy Dream Center in Seoul.

2 Detail der Fassade.



3 Beitrag von Einzelmaßnahmen zum Erreichen der Nullenergiebilanz.

Die Erzielung einer Nullenergiebilanz für Gebäude setzt folgende Bedingungen voraus:

- Minimierung des Energieverbrauchs durch eine qualitativ hochwertige Gebäudehülle
- Optimierung und Steuerung der technischen Systeme
- Deckung des Restenergiebedarfs durch lokal verfügbare erneuerbare Energiequellen

Die Stadt Seoul beauftragte das Fraunhofer ISE das Energy Dream Center zu entwerfen und mit einem interdisziplinären, deutschen und koreanischen Team umzusetzen. Wir erstellten das Energie- und Anlagenkonzept und überwachten sämtliche energierelevanten Festlegungen sowie deren Implementierung. Um eine Nullenergiebilanz zu erreichen, wurden verschiedene technische und architektonische Ansätze untersucht. Das favorisierte Design erlaubt eine optimale Tageslichtnutzung und stellt gleichzeitig einen guten Sonnenschutz bereit. Der Energieverbrauch wurde mit detaillierten Simulationsmodellen berechnet und optimiert (thermisches Gebäudeverhalten, Tageslichtversorgung, Wärmebrücken). Auf dieser Basis wurde eine optimale Gebäudehülle definiert und eine Lüftungsanlage mit zweistufiger Wärmerückgewinnung und adiabater Verdunstungskühlung dimensioniert. Der Wärme- und Kühlenergieverbrauch konnte um 70 % im Vergleich zum Standard in Korea gesenkt werden. Der verbleibende Heizenergiebedarf wird über erdreichgekoppelte Wärmepumpen gedeckt. Die Erdsonden werden im Sommer zur Flächenkühlung verwendet. Der Rest des Kühl- und Entfeuchtungsenergiebedarfs wird durch eine Vorkühlung der Zuluft in Kombination mit einer hocheffizienten Turbokompressionskühlung gedeckt. Der komplette Primärenergiebedarf wird über eine PV-Anlage bereit gestellt. Um das Energiekonzept und die Performance des Gebäudes zu überprüfen, ist ein Langzeit-Monitoring geplant.

Das Projekt wurde vom Seoul Metropolitan Government finanziert.



## NEUE KOMPONENTEN FÜR WÄRMEPUMPEN UND KÄLTEANLAGEN

**Das Fraunhofer ISE befasst sich seit mehr als zehn Jahren intensiv mit dem Verfahren der Kaltdampfkompresseion für Wärme- und Kälteanwendungen. Neben der umfangreichen Qualitätssicherung von Anlagen im praktischen Betrieb führen wir seit langem umfangreiche Arbeiten zur Entwicklung neuer Konzepte und Komponenten im Kältekreis durch. Bei der Entwicklung neuer Systemansätze arbeiten wir eng mit nationalen und internationalen Partnern zusammen.**

Simon Braungardt, Marek Miara, **Thore Oltersdorf**,  
Lena Schnabel, Peter Schossig, Christian Sonner,  
Hans-Martin Henning

In den vergangenen Jahren haben wir uns intensiv mit der Marktsituation, der Forschungslandschaft in Deutschland, Europa und weltweit sowie dem Stand der Technik und der Patentsituation von Komponenten der Kaltdampfkompresseion auseinandergesetzt. Auf dieser Basis konnten wir Themen identifizieren, die wir zu FuE-Schwerpunkten entwickelt haben. Durchgängiges Ziel unserer Arbeiten ist dabei eine Minimierung des Ressourcenverbrauchs durch Anlagen- und Materialeffizienz. Letztere geht eng einher mit der Volumenreduktion und der Reduktion der Kältemittelmenge in Komponenten und Rohrleitungen sowie dem Einsatz natürlicher Kältemittel. Die Kältemittelreduktion ist aber ein für alle Kältemittel anwendbarer Auslegungsansatz und nicht auf natürliche Kältemittel beschränkt.

Im EU-Projekt »GreenHP« erarbeiten wir Konzepte für gelötete luftbeaufschlagte Verdampfer. Bislang war der Einsatz dieser Wärmeübertrager nur unter Inkaufnahme von erheblichen exergetischen Verlusten möglich. Diese Verluste resultieren aus einer Fehlverteilung auf der Luft- aber auch der Kältemittelseite. Kernstück unseres Ansatzes ist ein aus anderen Anwendungsfeldern, z. B. das aus der Solarthermie

1 *Container der Firma Maersk am Teststand des Fraunhofer ISE.*

bekanntes Verfahren zur Fluidverteilung nach bionischen Prinzipien, wie es bereits seit mehr als einem Jahrzehnt mit FracTherm® am Fraunhofer ISE eingesetzt wird. Zusammen mit mehreren Firmen und Forschungspartnern setzen wir nun im Projekt »GreenHP« einen leicht abgewandelten Ansatz für die zweiphasige Fluidverteilung vor dem Verdampfer ein.

In Kooperation mit der Firma A. P. Moeller Mærsk und mehreren Fraunhofer-Instituten begann 2012 eine Zusammenarbeit zur Verbesserung von Kühlcontainern. Unter diesem Dach vereinigen sich die weltweiten Marktführer im Containerbau und Container-Transport, das Fraunhofer ISE koordiniert die Forschung an geeigneten Kältekreislösungen. Der Schwerpunkt des Vorhabens besteht darin, eine signifikante Verringerung der Lebenszykluskosten zu erreichen. Dabei stehen zwei Aspekte im Vordergrund: eine Beibehaltung der verhältnismäßig hohen Anlageneffizienz für Kühlcontainer im Marktvergleich und eine langfristige Produktkonformität hinsichtlich zu erwartender Forderungen nach einer Minderung der Treibhausgasemissionen von Kältemitteln.

Innovative Sicherheitskonzepte schließen unser Portfolio ab. Diese sind grundsätzlich für alle Kältemittel geeignet, insbesondere für Kältemittel der Sicherheitsgruppen A2/A2L/A3, gemäß ISO 5149. Mit Partnern für die mobile Kälteerzeugung wird dieser generische Ansatz bereits konkretisiert.

Das Projekt »GreenHP« wird von der Europäischen Union gefördert.





# WÄRMEPUMPEN IM ZUKÜNFTIGEN STROMNETZ

**Die Verknappung fossiler Ressourcen, die angestrebte Verminderung der Treibhausgasemissionen und der steigende Anteil von erneuerbaren Energien in der Stromversorgung sowie der Kernenergieausstieg verändern die etablierte Struktur der Energieversorgung in Deutschland entscheidend. Im Bereich der Stromproduktion setzt die Bundesregierung vor allem auf Sonne, Wind und Biomasse. Eine wesentliche Herausforderung ergibt sich in Folge durch die ansteigende zeitliche Diskrepanz zwischen Stromnachfrage und -angebot. Die fluktuierenden Erzeuger (Windkraft und Photovoltaik) richten sich einzig nach dem Angebot von Wind und Sonne, weshalb der Bedarf an Energiespeichern stetig wächst. Einen Lösungsansatz bietet die Umwandlung und Speicherung von Strom in thermischer Form in Wärmepumpenheizungsanlagen.**

Danny Günther, Sebastian Helmling, Thomas Kramer, Robert Langner, **Marek Miara**, Jeannette Wapler, Hans-Martin Henning

Bereits der konventionelle Einsatz der Wärmepumpentechnologie bringt im geeigneten Einsatzbereich wesentliche Vorteile mit sich. Bei korrekt geplanten und sorgfältig installierten Anlagen werden Effizienzwerte erzielt, die primär-energetische und ökologische Vorteile von Wärmepumpen gegenüber fossil befeuerten Brennwertgeräten ergeben. Dies sind nur die wesentlichsten Erkenntnisse, die in den vier bislang vom Fraunhofer ISE durchgeführten Feldtests mit rund 300 Anlagen gewonnen werden konnten. Die vorläufigen Ergebnisse aus dem aktuellen Projekt »WP Monitor« deuten zusätzlich auf eine stetige Effizienzverbesserung der Wärmepumpenanlagen in den letzten Jahren hin.

**1** *Wärmepumpenheizungsanlagen als Instrument zur Lastverschiebung im Stromnetz.*

Die Eignung von Wärmepumpenheizungsanlagen zur Lastverschiebung resultiert aus der Möglichkeit, die aus Strom und Umweltenergie bereitgestellte thermische Energie entweder in Warmwasserspeichern oder in der Gebäudemasse zu puffern. Hierdurch werden Bedarf und Verbrauch – zumindest anteilig – zeitlich entkoppelt. Optimierte Betriebszeiten tragen letztlich zu einem Lastverlauf im Stromnetz bei, der besser mit der Stromerzeugung übereinstimmt. Schon mit der heute installierten elektrischen Anschlussleistung könnten Wärmepumpen täglich in etwa die gleiche Menge elektrische Energie aufnehmen wie alle vorhandenen Pumpspeicherkraftwerke gemeinsam. Der mögliche Beitrag von Wärmepumpen zur Lastverschiebung ist eng mit deren Dimensionierung, der Regelung und Parametrierung sowie die Speicherkapazität im Heizsystem und im Gebäude verbunden. In aktuellen Arbeiten am Fraunhofer ISE konnte bereits nachgewiesen werden, dass real ausgeführte Systeme meist großzügig dimensioniert sind, um auch in der Kernheizperiode eine ausreichende Verschiebung der Betriebszeit zu ermöglichen. Weiterführende Arbeiten widmen sich der Analyse und Optimierung dieser Potenziale sowie der Untersuchung von Auswirkungen einer stromgeführten Betriebsweise auf die Effizienz der Wärmepumpenanlage.

[www.wp-monitor.ise.fraunhofer.de](http://www.wp-monitor.ise.fraunhofer.de)



1



2

© Società per azioni Esercizi Aeroportuali (SEA) SpA, Milano, Italy

# CASCADE – ENERGIEMANAGEMENT FÜR FLUGHÄFEN NACH ISO 50001

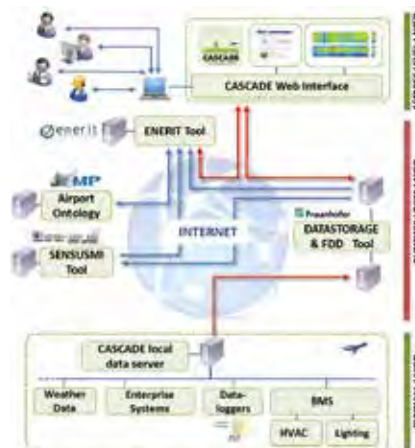
Flughäfen sind wichtige Verkehrsknotenpunkte und stellen öffentlich genutzte Bereiche mit einer hohen Energieintensität dar. Mit dem Projekt »CASCADE« wird der technische Teil eines ISO 50001 basierten Energiemanagementsystems mit integrierten Methoden zur Fehlererkennung und Betriebsoptimierung für gebäudetechnische Versorgungsanlagen an den Demonstrationsflughäfen Rom und Mailand in die Praxis umgesetzt. Der Fokus liegt auf einer informationstechnischen Lösung, die Energiemanager der Flughäfen bei der Identifizierung signifikanter Energieverbraucher und der Umsetzung technischer Energieeinsparmaßnahmen unterstützen soll.

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

Die Demonstrationsflughäfen Roma-Fiumicino und Milano-Malpensa zählen mit einem jährlichen Aufkommen von 36,3 Mio. bzw. 18,7 Mio. Passagieren zu den größten europäischen Flughäfen. Der jährliche Verbrauch von elektrischer Energie liegt in Fiumicino bei rund 175 GWh, in Malpensa bei rund 140 GWh. Über 70 % der eingesetzten elektrischen Energie wird für Beleuchtungszwecke sowie für Raumklima- und Heizungszwecke aufgewendet.

Die im Rahmen des Projekts »CASCADE« entwickelte informationstechnische Lösung (Abb. 3) soll die Flughafenbetreiber dabei unterstützen, fehlerhafte Anlagenbetriebszustände zu identifizieren, die zu einem höheren Energieverbrauch führen. Hierbei sollen Algorithmen zur automatisierten Fehlererkennung und Diagnose (FED) zum Einsatz kommen, die nach Betriebs- und Anlagenfehlern in den versorgungstechnischen Anlagen suchen. Für eine erste Testimplementierung werden gezielt bestimmte Anlagenteile zur Erarbeitung der innovativen

- 1 Check-In-Bereich im Terminal 1 des Flughafens Roma-Fiumicino. Zur Gewährleistung eines angenehmen Raumklimas werden dort große versorgungstechnische Anlagen eingesetzt, deren Betrieb energetisch optimiert werden kann.
- 2 Ostsicht des Flughafens Milano-Malpensa.

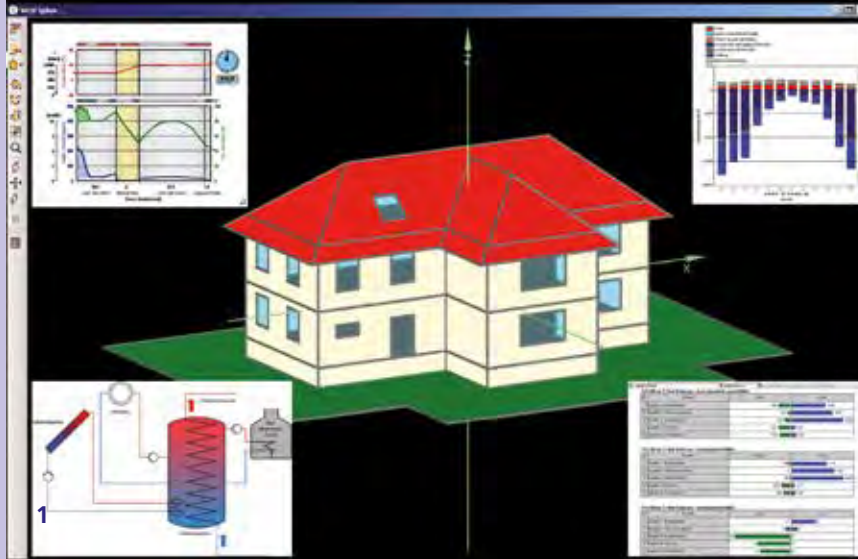


- 3 Informationstechnische Struktur der CASCADE-Lösung.

Energiemanagementwerkzeuge und zur Durchführung von Tests ausgewählt. Eine Ausweitung des erarbeiteten Wissens und erfolgreich getesteter Methoden auf weitere versorgungstechnische Anlagen kann anschließend folgen. Innerhalb der ausgewählten Teilsysteme sollen 20 % Primärenergie und 20 % CO<sub>2</sub> eingespart werden. Die betreiberseitig eingesetzten Investitionen sollen sich nach maximal drei Jahren amortisieren. Die Ergebnisse des Projekts sind auf andere Flughäfen und Großeinrichtungen mit ähnlichen Verbrauchsstrukturen übertragbar.

Das Projekt wird von der Europäischen Kommission im Rahmen des Seventh Framework Programme (FP7) gefördert.

[www.cascade-eu.org](http://www.cascade-eu.org)



© Fraunhofer IBP und Fraunhofer ISE

## WUFI PLUS THERM – PRAXISTAUGLICHE GEBÄUDE- UND ANLAGENSIMULATION

Die Planung von Gebäuden mit niedrigem Energiebedarf erfordert vermehrt den Einsatz thermischer Gebäudesimulationsprogramme. Diese ermöglichen die integrale Betrachtung des instationären Zusammenwirkens von Gebäude, Haustechnik und Nutzer unter realistischen Bedingungen. Insbesondere bei der Planung von Null- und Plusenergiegebäuden ist dies notwendig. Das Simulationsprogramm »WUFI Plus Therm« wurde auf Basis des Rechenkerns von »WUFI« entwickelt. Im hier vorgestellten Projekt wird »WUFI Plus Therm« weiterentwickelt und mit Modellen zur Simulation von haustechnischen Anlagen erweitert. Dies erfolgt in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, wobei das Fraunhofer ISE für die Anlagentechnikmodelle zuständig ist.

**Sebastian Burhenne**, Sebastian Herkel, Tobias Klimmt, Felix Ohr, Hans-Martin Henning

»WUFI Plus Therm« ist ein Programm zur Berechnung des thermischen Gebäudeverhaltens unter Berücksichtigung von Außenklimawerten, inneren Wärmelasten, Solltemperaturen, Lüftungsstrategien und Anlagentechnik. Die Gebäude- und Anlagenmodelle können mit Hilfe der grafischen Benutzeroberfläche erstellt werden. Simulationsergebnisse, z. B. Temperaturverläufe oder Energiebedarf, werden grafisch dargestellt und der Nutzer wird bei der Interpretation der Ergebnisse unterstützt.

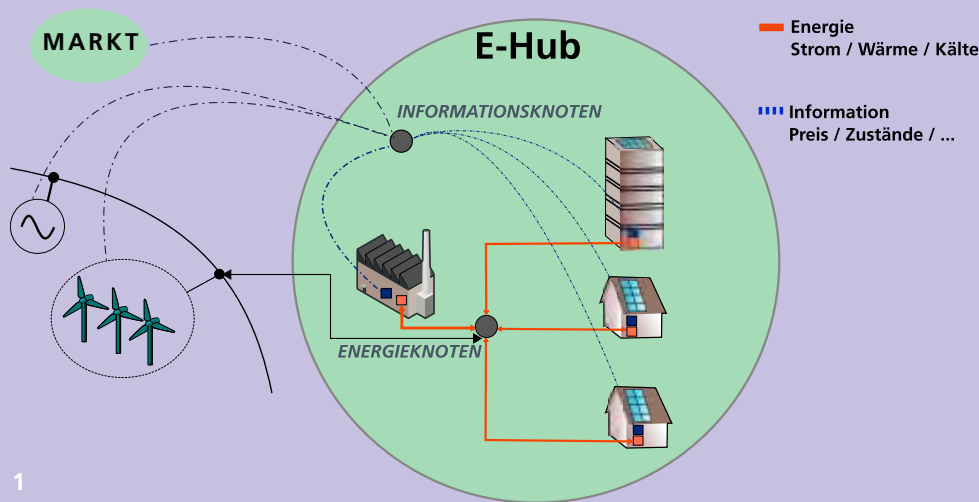
1 Beispiel einer Simulation mit »WUFI Plus Therm« und möglichen Ergebnisdarstellungen. Die unten links abgebildete Anlagenkonfiguration besteht aus einem thermischen Solarkollektor, einem Schichtenspeicher, einem Wärmeübergabesystem und einem Gas-Brennwertgerät.

Es werden Modelle für die am Markt üblichen Anlagentechnikvarianten entwickelt und implementiert. Dazu gehören unter anderem Gas-Brennwertkessel, solarthermische Kollektoren, Wärmepumpen, Schichtenspeicher, Heizkörper, thermoaktive Bauteilsysteme, Lüftungs- und Photovoltaikanlagen. Alle Anlagentechnikmodelle sind mit den üblichen Herstellerangaben parametrierbar, was für die Praxistauglichkeit wichtig ist. Da die am Markt verfügbare technische Gebäudeausrüstung stetig weiterentwickelt wird, liegt ein besonderes Augenmerk auf der Erweiterbarkeit der Anlagentechnikmodelle. Dies wird erreicht, indem Modelle, die mit der Modellersprache Modelica erstellt wurden, verwendet werden. Diese Modelle werden in diversen Projekten am Fraunhofer ISE kontinuierlich weiterentwickelt. Somit können aktuelle Forschungsergebnisse zeitnah in das Gebäudesimulationsprogramm »WUFI Plus Therm« überführt werden.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt. Weitere Informationen und die kostenfreie thermische Version des Programms können im Internet abgerufen werden. Die hygrothermische Version ist kostenpflichtig.

[www.enob.info/de/software-und-tools](http://www.enob.info/de/software-und-tools)





# ENERGIEMANAGEMENT VON GEBÄUDEN UND QUARTIEREN

**Das Zusammenspiel des Energiemanagements einzelner Gebäude innerhalb eines Quartiers mit den übergeordneten Netzen unterstützt die Integration von dezentralen erneuerbaren Energien. Ausgleich von Über- und Unterangebot erneuerbarer Energien tragen dazu bei, die Systemstabilität zu erhöhen. Im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts werden Zusammenhänge und Verknüpfungen zwischen Strom- und Wärmemarkt auf Quartiersebene aufgezeigt. Dabei werden Regelungsstrategien für das Energiemanagement unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kriterien für thermische und elektrische Komponenten innerhalb eines Quartiers entwickelt.**

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

Das Angebot erneuerbarer Energien stimmt aufgrund von Fluktuationen nicht immer mit der Energienachfrage zeitlich überein. Neben der Speicherung von erneuerbaren Energien sind die intelligente Regelung und Verteilung von verfügbaren Energien an unterschiedliche Verbraucher eine vielversprechende Möglichkeit einen stärkeren Ausgleich zu erzielen. Unter Einbeziehung der Interaktion zwischen den Komponenten einzelner Gebäude sowie zwischen den Gebäuden innerhalb eines Quartiers kann die Erzeugung, Verteilung und der Verbrauch in effizienter Weise gestaltet werden. Insbesondere unter der Berücksichtigung energiewirtschaftlicher Aspekte ist das Energiemanagement auf Quartiersebene zunehmend in den Fokus gerückt. Das Projekt »Weingarten 2020« lieferte umfangreiche Ergebnisse zur Strukturoptimierung, auf deren Basis sich Strategien zur Betriebsoptimierung erarbeiten lassen.

Im Rahmen des EU-Projekts »E-Hub« erarbeiten wir gemeinsam mit europäischen Partnern effiziente Algorithmen zur Interaktion zwischen den Komponenten von Energiesystemen

1 Vereinfachtes Schema zum Konzept des Projekts »E-Hub«. Zentrales Element des Projekts ist die Entwicklung von Algorithmen für das Last- und Erzeugungsmanagement von thermischer und elektrischer Energie für dezentrale Anlagen unter Einbeziehung von energiewirtschaftlichen Steuergrößen.

auf Gebäude- und Quartiersebene, die sowohl ökonomische als auch ökologische Anforderungen erfüllen. Für die Beurteilung von Betriebszuständen und daraus abgeleiteter Betriebsoperationen verwenden wir die Multikriterien-Analyse, wobei wir auf Ergebnisse aus dem Projekt »Weingarten 2020« zurückgreifen konnten. Im entwickelten Konzept werden Energieflüsse innerhalb eines Quartiers identifiziert und zu Knoten zusammengefasst. Der Austausch von Energie und Information an diesen Knoten ermöglicht ein effizientes Management von Energiebedarf und Bereitstellung unterschiedlicher Verbraucher und Erzeuger.

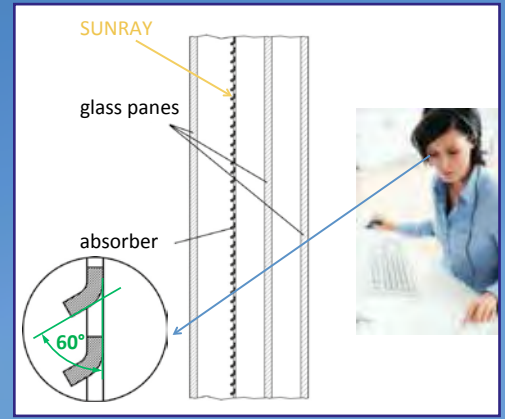
Multiagentenbasierte Regelungsalgorithmen helfen die richtigen Entscheidungen zu treffen. Dabei werden thermodynamische Zustände einzelner Komponenten und energiewirtschaftliche Rahmenbedingungen einbezogen, mit dem Ziel, maximale Integration und Nutzung von erneuerbaren Energien zu ermöglichen.

Ziel unserer Arbeiten ist es, Methoden und Algorithmen zu entwickeln, die zukünftig von Energieversorgern oder Netzbetreibern zum Energiemanagement auf Quartiersebene verwendet werden können.

Das Projekt wird durch die Europäische Kommission gefördert.



1



## »COST-EFFECTIVE« – NEUE SOLARTHERMIE- UND BIPV-FASSADENKOMPONENTEN

**Ziel des EU-Projekts »Cost-Effective« war es, Fassaden von Bestands-Hochhäusern für die thermische oder photovoltaische Solarenergienutzung zu erschließen. Der Fokus lag auf Bürogebäuden. Im Rahmen des vom Fraunhofer ISE koordinierten Projekts wurden vier neue solare Fassadenkomponenten und ein Lüftungssystem mit dezentraler Wärmerückgewinnung entwickelt.**

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

**1** *Teiltransparenter thermischer Fassadenkollektor, Pilotinstallation in Slowenien, Integration in eine Closed Cavity Façade-Fassade (links). Integration in eine gasdicht versiegelte Isolierverglasung (Mitte). Der Kollektor blockt hohe Sonnenstände, vermindert dadurch den Kühlbedarf und erlaubt trotzdem Durchsicht nach draußen (Prinzipskizze, rechts).*

**2** *Vakuumröhren-Luftkollektoren im Pilotgebäude in Slowenien.*

### Teiltransparente solarthermische Fassadenkollektoren

Im Rahmen des Projekts wurden zwei verschiedene Konzepte für die Fassadenintegration von teiltransparenten, flachen Solarabsorbern entwickelt: Zum einen wurden die Absorber in gasdicht versiegelte Dreifach-Isolierverglasungen (Abb.1 Mitte) integriert, zum anderen in die Closed Cavity Façade (CCF) eines Projektpartners. Die CCF ist nicht komplett druckdicht, wird aber durch einen konstanten Volumenstrom mit getrockneter, sauberer Luft auf Überdruck gehalten, so dass kein Schmutz und keine Feuchtigkeit von außen eindringen können.

Die Kollektoren eignen sich zum solaren Heizen und für solare (sorptive) Entfeuchtung. Bei beiden Anwendungen sind Kollektorbetriebstemperaturen über 55 °C notwendig, die gut in der Fassade erreicht werden können. In einigen Fällen können die Kollektoren auch für die solare Kühlung (Arbeitstemperaturen über 70 °C) eingesetzt werden. Die multifunktionalen Kollektoren bieten darüber hinaus Sonnen- und Blendschutz und erlauben den Sichtkontakt nach draußen. Sie sind für den Einsatz im Brüstungsbereich konzipiert, bei dem die Nutzer vor allem von innen oben nach außen unten blicken. Darüber hinaus ist der Brüstungsbereich kaum relevant für die Tageslichtversorgung im Raum, so dass sich der verringerte Lichttransmissionsgrad für hohe Sonnenstände wenig bis gar nicht negativ auswirkt. Wichtig ist die Beachtung der Tatsache, dass die neuen, aktiven Fassadensysteme einen g-Wert haben, der sich um den Faktor zwei ändern kann, je nach Temperatur des Solarkollektors. Um dieser Tatsache Rechnung zu tragen und um die Komponenten bei der Gebäudeplanung berücksichtigen zu können, wurden neben realen Komponenten auch Modelle für das Gebäudesimulationsprogramm TRNSYS entwickelt und mit kalorimetrischen Messungen validiert.



2

**Vakuurröhren-Luftkollektoren**

Das Prinzip dieses Luftkollektors beruht darauf, dass ein inneres, hoch absorbierend und niedrig emittierend beschichtetes Absorberrohr vom Wärmeträgermedium Luft durchströmt wird. Das Absorberrohr befindet sich in einem isolierenden äußeren Glasrohr. Im Zwischenraum zwischen äußerem und innerem Rohr befindet sich Vakuum oder Edelgas zur thermischen Isolation. Es wurden im Projekt zwei Röhrenkonzepte untersucht: Zum einen konventionelle »Sydney«-Röhren, bei denen Luftzu- und -abfuhr über die gleiche Seite mit Ringspalt erfolgt, sowie Röhren, bei denen die Luft auf einer Seite zuströmt und auf der anderen Seite abströmt. Diese Röhren erlauben durch Aneinandersetzen den Aufbau von langen, kontinuierlichen Luftkollektorröhren. Der zweite Typ wurde in einer Pilotanlage in Slovenien realisiert (Abb. 2).

**Putzintegrierter, nicht verglaster Kollektor kombiniert mit einer multi-source Wärmepumpe**

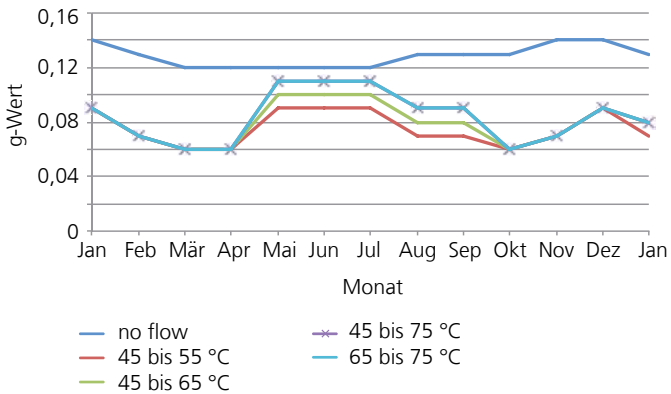
Hier bilden in die Putzschicht integrierte Kapillarrohrmatten einen unverglasten, von außen nicht wahrnehmbaren Kollektor, der mit einer Wärmepumpe kombiniert ist. Um die Wärmepumpe bei Bedarf auch in Zeiten betreiben zu können, in denen eine Vereisung der Fassade befürchtet werden muss, wurde die Wärmepumpe zusätzlich mit Luft als Umweltwärmequelle ausgestattet. Ziel ist es, die Wärmepumpe möglichst dann zu betreiben, wenn die Fassade besonnt und der Heizenergiebedarf aufgrund der passiven Gewinne niedrig ist. Daher wurde auch noch ein Wärmespeicher ins Konzept aufgenommen.

**Winkelselektiv transparente BIPV-Verglasung**

Neben den drei thermischen Fassadenkollektoren wurde eine winkelselektiv transparente BIPV-Verglasung entwickelt. Auch diese Verglasung ist für den Einsatz im Brüstungsbereich konzipiert und bietet neben der Solarstromgewinnung zugleich Sonnenschutz und Durchsicht.

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

[www.cost-effective-renewables.eu](http://www.cost-effective-renewables.eu)



3 *Mittlere monatliche g-Werte für einen transparenten Fassadenkollektor auf Basis einer Dreifach-Verglasung. Die rote Linie zeigt den effektiven, monatlichen g-Wert für den Stagnationsfall (Maximalfall). Die anderen Linien zeigen den g-Wert für verschiedene Betriebsmodi mit unterschiedlichen Absorbertemperaturen.*



© Kramer GmbH

## SOLARE KÜHLUNG – NEUE ENTWICKLUNGEN UND SYSTEMANALYSE

**Die Nutzung solarthermischer Energie für die Klimatisierung von Gebäuden findet wachsende Verbreitung, vor allem in Ländern mit hoher Sonneneinstrahlung und hohen Kühllasten. In den vergangenen Jahren wurden zunehmend Verfahren und Anlagen entwickelt, die solarthermisch angetriebene Kühlverfahren auch für gewerbliche und industrielle Prozesse nutzbar machen. Am Fraunhofer ISE hat das Thema solare Kühlung eine lange Tradition. Im vergangenen Jahr konnten wir in einer Vielzahl von Forschungsvorhaben sowohl die Entwicklung neuer Verfahren in Kooperation mit industriellen Partnern vorantreiben als auch Querschnittsanalysen installierter Anlagen durchführen und die Perspektive der solaren Kühlung in einem Grundlagenprojekt umfassend analysieren.**

Constanze Bongs, Jochen Döll, Gerrit Földner, Florian Mehling, Alexander Morgenstern, Björn Nienborg, Lena Schnabel, Peter Schossig, Christine Weber, Edo Wiemken,  
**Hans-Martin Henning**

Ziel des Projekts »AgroKühl« ist es, ein solar-thermisch betriebenes Kühlhaus als integriertes Gesamtkonzept inklusive der Kälteerzeugung aus erneuerbaren Energien und Kältespeicherung zu entwickeln. In der Nähe von Freiburg wurde auf dem Gelände der Firma Kramer – einer der vier Projektpartner des Fraunhofer ISE – eine Pilotanlage errichtet, um u. a. Erfahrungen über das Zusammenspiel von Kühlraum und Solarsystem in Abhängigkeit von der Benutzungsart des Kühlraums zu erhalten. Die errichtete Anlage besteht aus einem 88 m<sup>2</sup> großen Fresnel-Kollektor, der Prozesswärme bei 180 °C erzeugt, sowie einer einstufigen Wasser-Ammoniak-Absorptionskältemaschine mit integriertem trockenem Rückkühlwerk. Damit kann solarthermisch Kälte deutlich unter 0 °C erzeugt werden, die in zwei konventionellen Eisspeichern zwischengelagert werden kann. Das neu errichtete Kühllager

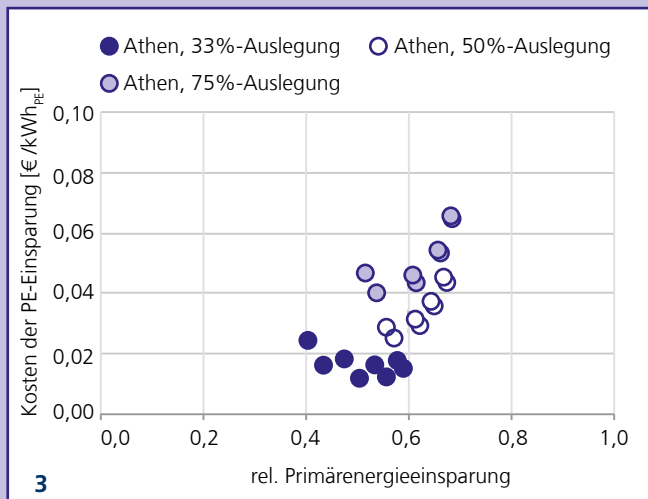
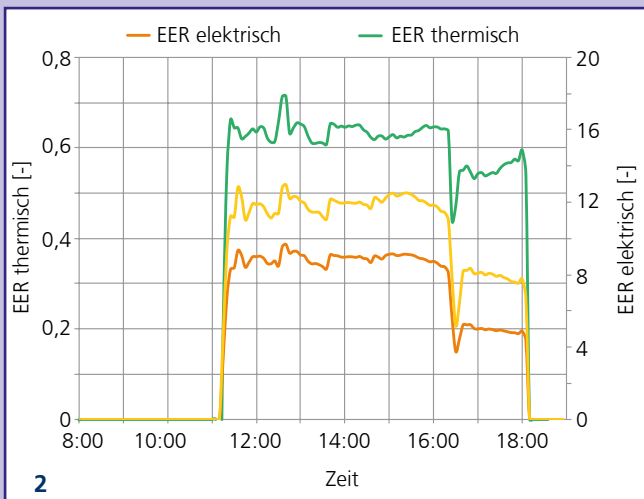
hat ein Volumen von ca. 100 m<sup>3</sup> sowie einen Vorraum. Die Pilotanlage ist seit Juli 2012 in Betrieb. Aus den in der Pilotanlage gewonnenen Erkenntnissen wird ein Gesamtsystem entwickelt, das durch Sparsamkeit, Effizienz und einen hohen Anteil erneuerbar erzeugter Kälte den Energieverbrauch minimiert, dabei jedoch trotz fluktuierender Kälteproduktion die Qualität der verderblichen, zu kühlenden Güter jederzeit aufrecht erhält.

Eine ähnliche Anlage wurde im EU-Projekt »SOLERA« ebenfalls in Freiburg aufgebaut und vermessen. Aktuelle Messergebnisse belegen die große Zuverlässigkeit und den stabilen Betrieb.

Gemeinsam mit der Firma Vaillant entwickeln wir ein neuartiges System zur solaren Kühlung, bei dem die Sorptionsmodule in den Solarkollektor integriert sind. Dieser Ansatz erlaubt höhere Desorptionstemperaturen und aufgrund des Chargenbetriebs eine zeitliche Entkopplung von Solarantrieb und Kältebereitstellung. Dadurch lassen sich die niedrigeren Nachttemperaturen zur Rückkühlung nutzen. Als Arbeitspaar werden hygroskopische Salze und Wasser in Betracht gezogen, wodurch hohe Speicherdichten erreicht werden. Es wird ein Leistungsbereich von 3–10 kW Kälteleistung angestrebt. Am Fraunhofer ISE steht im Rahmen des Projekts die experimentelle Charakterisierung des dynamischen Leistungsverhaltens der Sorptionsmodule und Sorptionskollektoren sowie die simulationsbasierte Komponenten- und Systembeschreibung und Optimierung mit TRNSYS im Mittelpunkt. Das Vorhaben »KollSorp« wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) unterstützt.

Weltweit sind heute viele hunderte solar betriebene Kühlsysteme unterschiedlichster Leistung – von einigen wenigen kW Kälteleistung bis zu Anlagen im MW-Bereich – im Einsatz. Allerdings zeigt sich bei vielen Anlagen nach wie vor eine nicht-optimale Abstimmung der Komponenten – Solaranla-





**1** Im Projekt »AgroKühl« werden weltweit erstmals solarthermische Kollektoren für die Kühlung von Lebens- oder Arzneimitteln in Kühlhäusern eingesetzt.

gen, Kältemaschine, Rückkühlwerk, Regelung – sowie eine unzureichende Erfahrung im Bereich der Anlagenplanung und des Anlagenbaus. Im Projekt »Solcoolsys« haben wir daher gemeinsam mit den Firmen Solvis und Sortech Anlagenkonzepte für den kleinen Leistungsbereich entwickelt und einem Feldtest unterzogen. Inzwischen sind fünf Anlagen in vier Ländern installiert und mit detaillierter Messtechnik versehen. Sie sollen im kommenden Jahr dazu genutzt werden, die Regelstrategien zu optimieren und insbesondere Rückkühlkonzepte zu erproben.

Ein Schlüssel für den Erfolg solarer Kühlsysteme ist ihre Praxistauglichkeit in der alltäglichen Anwendung. Im Rahmen des Programms »Solarthermie2000plus« des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) haben wir das Ministerium bei der Auswahl von geförderten Demonstrationsvorhaben unterstützt und eine Querschnittsanalyse von Anlagen der solaren Kühlung durchgeführt. Bei diesem Vorhaben konnten wir eine detaillierte Analyse von insgesamt fünf Anlagen vornehmen und wichtige Hinweise zur Verbesserung der Anlagenauslegung und des -betriebs liefern.

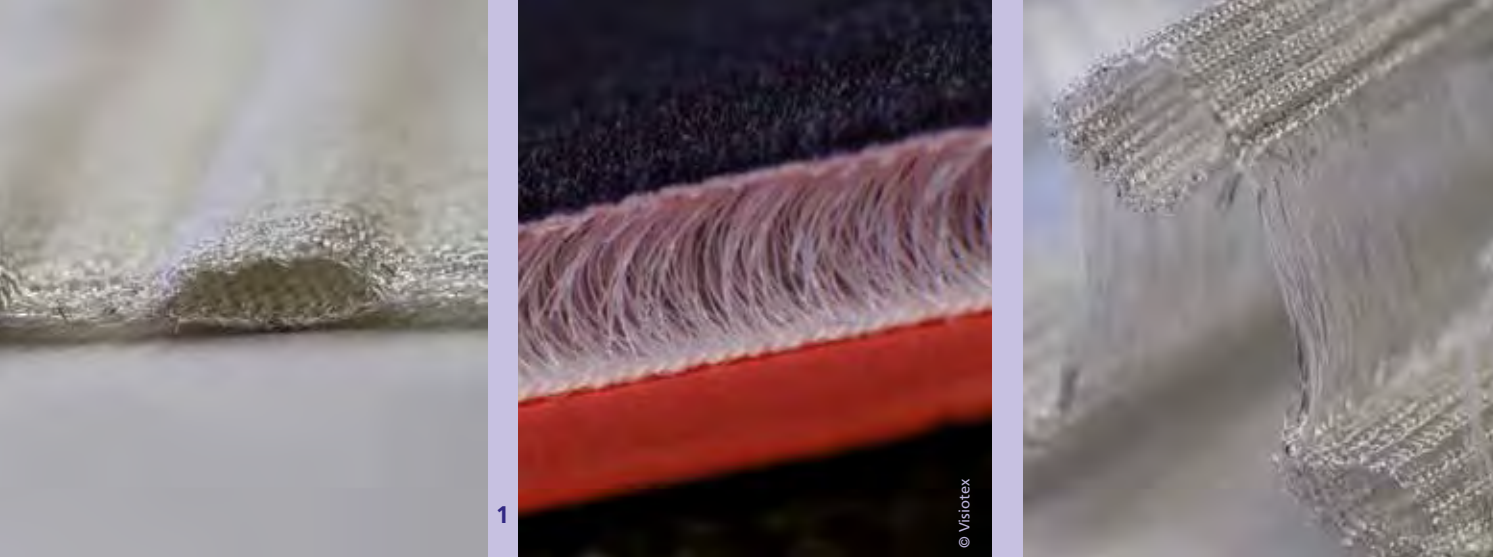
In den vergangenen zehn bis 15 Jahren wurden erhebliche Fortschritte bei Anlagen der solaren Kühlung erreicht. Durch die stark gefallen Preise für Photovoltaik-Module sind neben solarthermisch angetriebenen Verfahren heute auch solarelektrische Verfahren eine wirtschaftlich interessante Option. Gemeinsam mit dem ZAE Bayern und dem ILK Dresden führen wir eine durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) finanzierte umfangreiche Studie zur mittel- bis langfristigen Perspektive der solaren Kühlung durch (EvaSolK). Dabei werden beide

**2** Messergebnisse an der solaren Kälteanlage des Projekts »SOLERA«. Der EER beschreibt das Verhältnis von Leistungsabgabe zu Leistungsaufnahme. Die linke Abszisse zeigt den thermischen EER und die rechte Abszisse den elektrischen EER. Gemittelter Tagesverlauf, Beispieltag 23.07.2012.

**3** Beispiel für den Einfluss der Dimensionierung der thermisch angetriebenen Kälteversorgung (TKM) in einem Hotel in Athen. Als Kälte-Backup ist eine elektrisch betriebene Kompressions-Kältemaschine vorhanden. Wird die Nennleistung der TKM von 75 % der maximalen Kühllast im Gebäude reduziert auf 33 % der maximalen Kühllast, nähern sich die Kosten der Primärenergieeinsparung bereits stark den Kosten des konventionellen Vergleichssystems an (Kosten der PE-Einsparung > 0: Mehrkosten gegenüber Referenz). Eine zusätzliche Kostensenkung der Gesamtinvestitionskosten Solarsystem/TKM-System um 10 % führt bereits zur wirtschaftlichen Vergleichbarkeit.

Varianten, solarthermische wie solarelektrische Verfahren, durch eine Vielzahl von Simulationen und darauf aufbauenden Parameterstudien hinsichtlich ihrer energetischen Leistungsfähigkeit sowie ihrer Wirtschaftlichkeit untersucht. Im Fokus der Untersuchung stehen unterschiedliche Anwendungsbereiche von Hotels über Bürogebäude bis zu Wohngebäuden und unterschiedliche klimatische Bedingungen von kontinental/mediterran bis heiß/sonnig.

Mit der heutigen Kostenstruktur entstehen bei Anlagen der solaren Kühlung in der Regel Mehrkosten gegenüber einem konventionellen Vergleichssystem. In den Anwendungen mit einstufiger, thermisch betriebener Kältetechnik zeigt sich aber, dass Standorte mit hohen Betriebszeiten der Kälteversorgung und einem zusätzlichen hohen Wärmebedarf (z. B. für Brauchwarmwasserversorgung in Hotels) die Anwendung der solaren Kühlung begünstigen. Wird darüber hinaus der thermisch angetriebene Teil der Kälteversorgung nicht auf Spitzenlast dimensioniert, kann bereits in Einzelfällen Wirtschaftlichkeit erreicht werden. Mit einem Maßnahmenbündel aus Effizienzsteigerung, moderater Kostensenkung und sorgfältiger Anlagenauslegung sowie hoher Ausnutzung des Kollektorfelds auch für weitere Wärmeversorger ist die solare Kühlung an warmen Standorten wirtschaftlich konkurrenzfähig.



## EFFIZIENTE WÄRMEÜBERTRAGUNG DURCH METALLISCHE GEWEBESTRUKTUREN

**In vielen Anwendungsfeldern spielt die effiziente Wärmeübertragung eine Schlüsselrolle für die Erhöhung der Energieeffizienz. Dies gilt gleichermaßen für Anwendungen in der Industrie wie auch in der Heizungs- und Kältetechnik. Übliche Vorgehensweisen zur Verbesserung von Wärmeübertragungseigenschaften sind optimierte Auslegungen, die Verwendung innovativer Materialien oder auch das Design optimierter Strömungsformen. Ein weiterer Ansatz besteht in einem Transfer von Verfahren oder Methoden aus anderen Disziplinen wie hier vorgestellt, der Textiltechnik.**

Eric Laurenz, **Lena Schnabel**, Ursula Wittstadt, Hans-Martin Henning

Im Projekt »EffiMet« steht die Applikation innovativer textiler Fertigungsverfahren zur Umsetzung hocheffizienter Wärmeübertragerstrukturen im Mittelpunkt. Die Forschungsarbeiten haben die Weiterentwicklung der textilen Fertigungstechnik für metallische Strukturen zum Ziel. Dabei wird aus den Innovationen der letzten Jahre geschöpft, die textilbasierte Produkte mit einer sehr großen geometrischen Vielfalt hervor gebracht haben.

Textile Fertigungsverfahren erlauben aufgrund der hohen Fertigungs- und Materialflexibilität ein optimiertes Design der Strukturen hinsichtlich volumenspezifischer Oberfläche, Wärmeleitung und Druckverlust. Die Identifikation geeigneter Strukturen wird simulationsbasiert durchgeführt, an Musterproben wird die erreichte Charakteristik vermessen und überprüft. Im Projekt werden insbesondere Wärmeübertragungsanwendungen adressiert, die eine große spezifische oder strukturierte Oberfläche und flexibel dimensionierbare Geometrien erfordern. Zu nennen sind hier Luft/Wasser-

**1** Die Abbildungen zeigen textile Strukturfertigungsmöglichkeiten zur Erzeugung von Strömungsstrukturen durch die Kombination von Wirk- und Strickverfahren. Auf dem mittleren Bild ist stark vergrößert eine Abstandsgewebestruktur zu erkennen, die als Turbulenzstruktur oder vergrößerte Oberfläche für eine Beschichtung dienen könnte. Rechts und links sind Musterkanalstrukturen dargestellt, die bereits mit Metalldraht gefertigt wurden und im Rahmen des Projekts untersucht und bewertet werden.

Wärmeübertrager sowie Verdampfer und Kondensatoren. Es ist uns bereits gelungen, die textile Fertigungstechnik so zu adaptieren, dass zur Wärmeübertragung geeignete Strukturen aus feinen Metalldrähten gefertigt werden konnten. Zur Modifikation und Stabilisierung der Strukturen sowie zur Versiegelung der Kanalwandungen werden galvanische, chemische und suspensionsbasierte Beschichtungsverfahren untersucht und weiterentwickelt.

Das vom Fraunhofer ISE initiierte und koordinierte Projekt findet in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung IFAM in Dresden sowie der Visiotex GmbH als Textilhersteller und der Hattler & Sohn GmbH als Galvanikbeschichter statt.

Das Projekt wird im Rahmen des KMU-innovativ-Programms des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.



## INDIREKTE SORPTIVE BESCHICHTUNGEN VON WÄRMEÜBERTRAGERSTRUKTUREN

Für sorptiv beschichtete Wärmeübertrager besteht ein großes Anwendungspotenzial in der Heizungs- und Kältetechnik. Überall dort, wo Wärme als Antriebsenergie in Wärmepumpen oder Kälteprozessen verwendet wird, birgt die Optimierung des Wärme- und Stofftransports großes Potenzial für eine deutliche Effizienzsteigerung. Insbesondere bei Sorptionsanwendungen, z. B. der Adsorption von Wasserdampf an den inneren Oberflächen von porösen Materialien, muss zum einen eine gute Zugänglichkeit des Wasserdampfs an diese Oberflächen gewährleistet sein, zum anderen aber auch die entstehende Wärme schnell abgeführt werden.

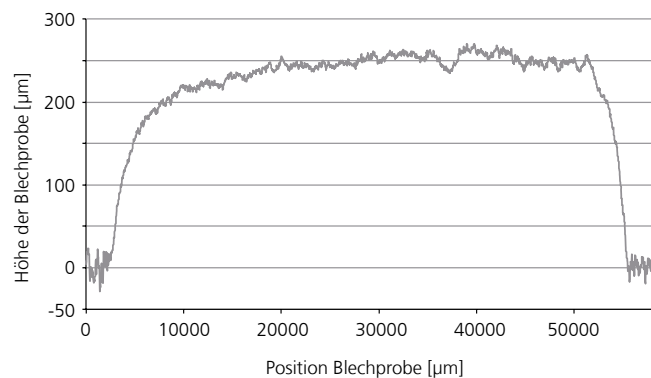
Am Fraunhofer ISE konnten wir vielversprechende Beschichtungsverfahren zur Fixierung von verschiedenen Sorptionsmaterialien auf Wärmeübertragerstrukturen entwickeln.

**Stefan Henninger, Harry Kummer,** Peter Schossig, Hans-Martin Henning

Durch die erfolgreiche Synthese von neuen Sorptionsmaterialien mit deutlich gesteigerter Adsorptionskapazität, z. B. Verbindungen aus der Klasse der metall-organischen Gerüstmaterialien (MOF), erhöhen sich die Anforderungen an den Stoff- und Wärmetransport. Dadurch muss im Hinblick auf die erreichbare Leistungsdichte des Gesamtprozesses eine hohe thermische Ankopplung der Sorptionsmaterialien an die Trägerstruktur bei gleichzeitig sehr guter Zugänglichkeit der Adsorptionszentren erreicht werden.

Daher haben wir uns intensiv mit der Beschichtung von verschiedenen Trägerstrukturen aus unterschiedlichen Materialien wie Metallen und Keramiken beschäftigt. Hier ist es uns gelungen, neue Beschichtungsverfahren zu entwickeln und zum Patent anzumelden.

1 Indirekte Beschichtung einer dreidimensionalen Trägerstruktur.



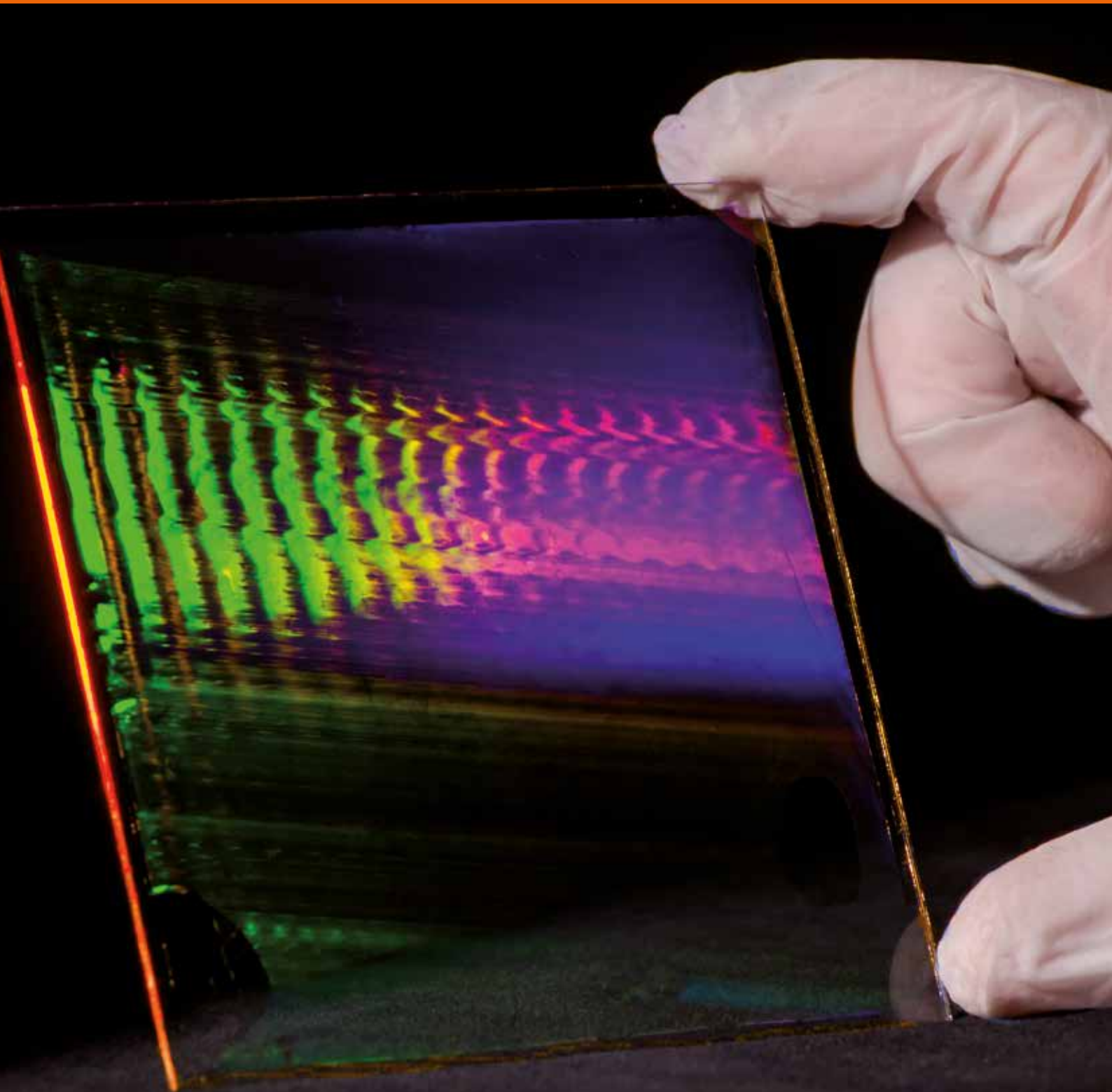
2 Schichtdickencharakterisierung auf einer ebenen Blechprobe mit einer maximalen Dicke von 250 µm.

Vollflächige Beschichtungen auf gut wärmeleitenden Strukturen (z. B. Metallen) stellen eine attraktive Möglichkeit zur Optimierung bei gleichzeitig guter Adaption an industrielle Fertigungsprozesse (z. B. Tauchbäder) dar. Typische Anwendungen sind thermisch angetriebene Wärmepumpen oder Kältemaschinen, aber auch Entfeuchtung, Abgasbehandlung oder katalytische Prozesse.

Bei der indirekten Beschichtung wird das Sorptionsmaterial mit einem Haftvermittler (Binder) auf die Trägerstruktur aufgebracht. Neben der Variation des Binderanteils konnten durch Zusatz von Hilfsstoffen auch die rheologischen Eigenschaften an die Tauchbeschichtung angepasst werden. Hierbei konnten bereits dreidimensionale Trägerstrukturen mit Abmessungen von bis zu 10 x 10 cm erfolgreich beschichtet werden. Die Arbeiten zur Beschichtungsentwicklung wurden 2012 mit dem 2. Hugo-Geiger Preis der Fraunhofer-Gesellschaft ausgezeichnet. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) unterstützt.



**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  $\mu\text{m}$  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.

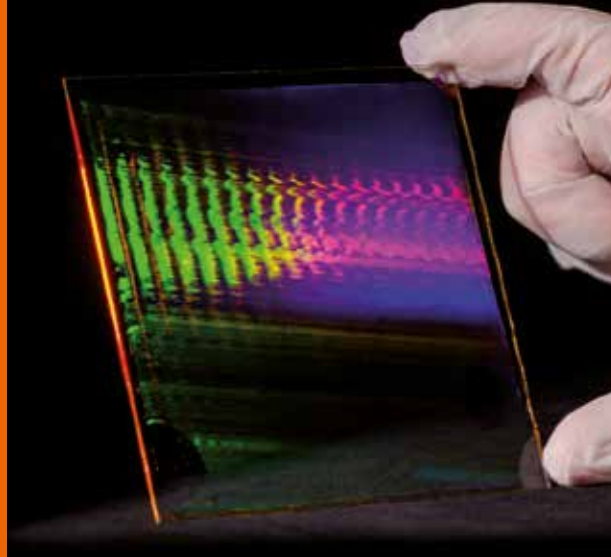
Die effektive Regelung des solaren Licht- und Energiestroms in der Fassade ist bei großflächig verglasten und energieeffizienten Gebäuden sehr wichtig. Schaltbare Beschichtungen auf Fensterscheiben erlauben es, die Transmission der Fenster über eine große Bandbreite zu verändern. Als nicht-mechanische 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. Stabile Funktionsschichten können auch auf die Außenseite von Verglasungen gebracht werden, z. B. um Beschlag zu verhindern oder auch Verstaubung und Verschmutzung zu reduzieren. 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. Mit plasmonischen Strukturen können auch neuartige Konzepte, z. B. Hochkonversion von Photonen, verfolgt werden. 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 Lichtstreuung und Lichtlenkung 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 (150 x 400 cm<sup>2</sup>) komplexer Schichtsysteme
- Interferenzlithographieanlagen zur homogenen Herstellung von Mikro- und Nanostrukturen auf Flächen von bis zu 120 x 120 cm<sup>2</sup>
- 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

*Glassubstrat mit einer durch Nanoimprintlithographie (NIL) strukturierten Lackschicht. In diesem NIL-Prozess wird mit einem Silikonstempel eine Struktur in eine Lackschicht übertragen und unter UV-Licht ausgehärtet. Die Lackschicht dient danach als Basis für die Herstellung von metallischen Nanostrukturen mit Hilfe eines Lift-Offs (s. S. 42). Metallische Nanostrukturen werden aufgrund ihrer spektral selektiven Eigenschaften für die effiziente Lichtausnutzung in Solarzellen untersucht.*

**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

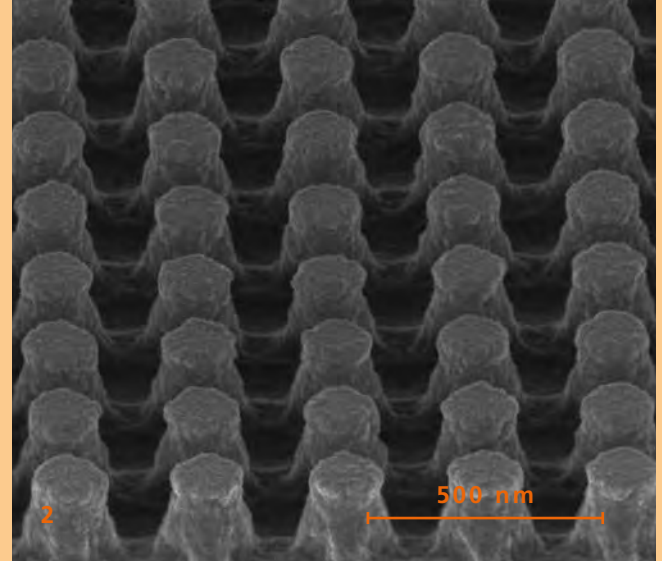
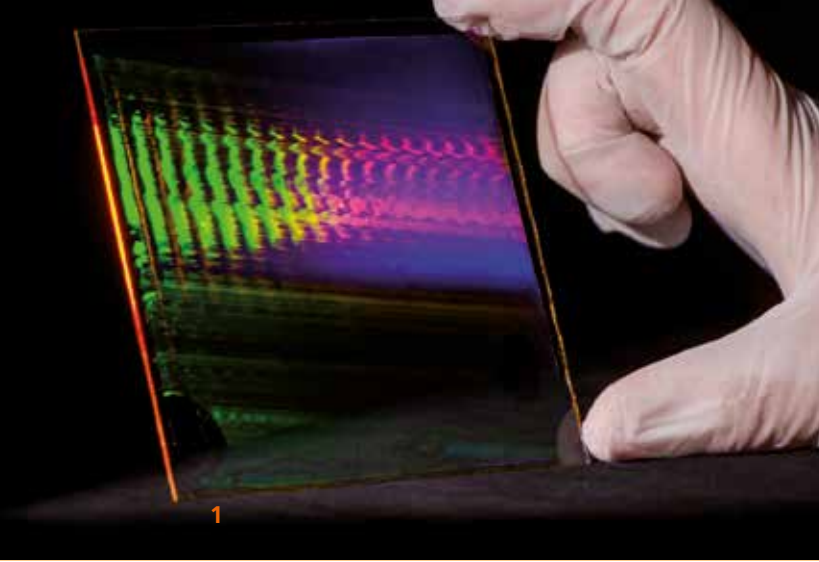
---

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

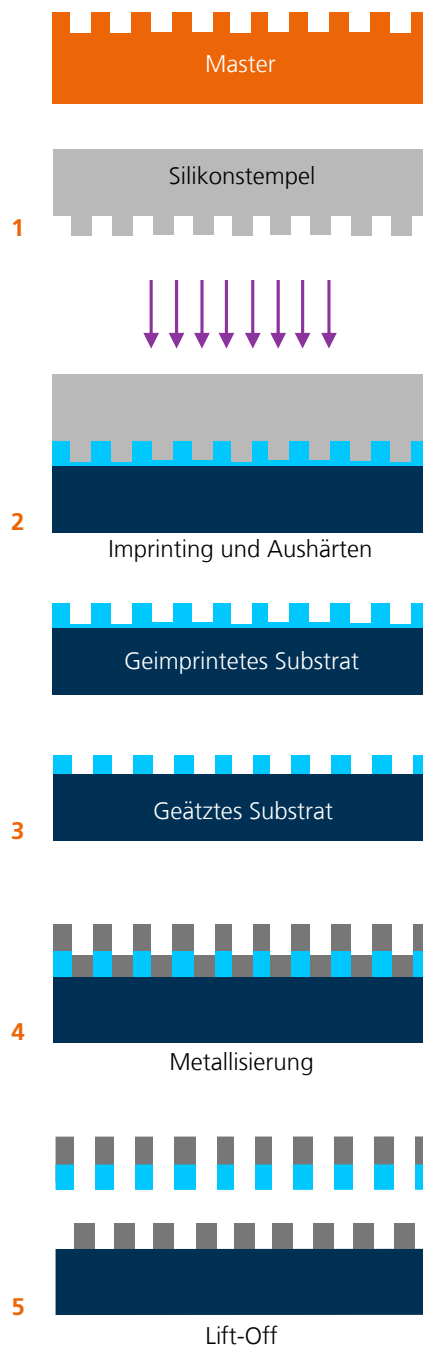
---

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

---



## GEORDNETE METALLISCHE NANOPARTIKEL FÜR PLASMONISCHE EFFEKTE

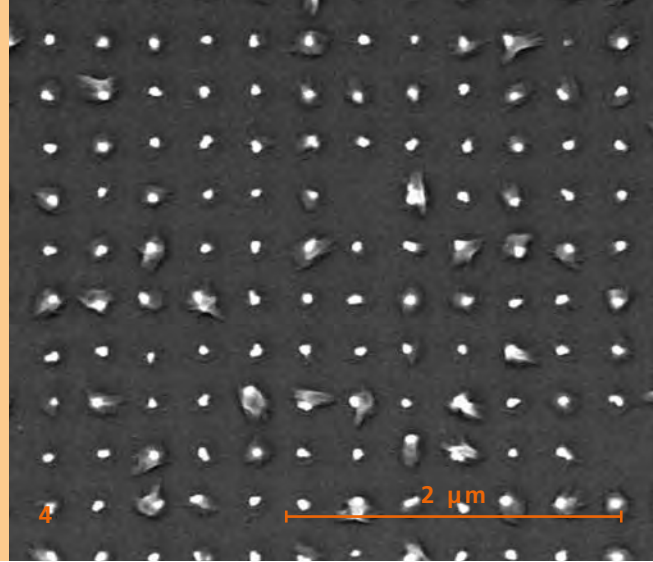
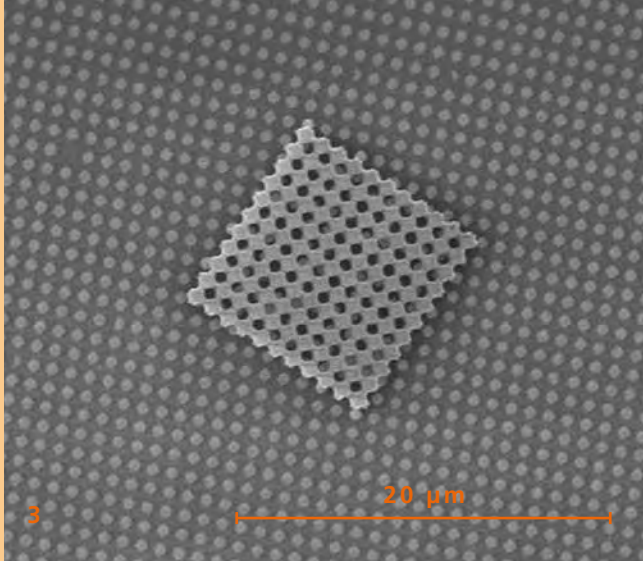


Metallische Nanopartikel erfahren in der Wissenschaft seit einigen Jahren enorme Aufmerksamkeit. Die spektral selektiven, das Licht streuenden und beugenden Eigenschaften dieser Partikel basieren auf Resonanzphänomenen. Aufgrund dieser Selektivität können sie z. B. für das Photonenmanagement in Solarzellen eingesetzt werden. In schwach absorbierenden Wellenlängenbereichen kann durch gezielte Streuung die Weglänge des Lichts innerhalb der Zelle und dadurch die Absorption erhöht werden. Lokale Feldüberhöhungen aufgrund der plasmonischen Licht-Elektron-Wechselwirkung können für die Unterstützung nichtlinearer Effekte (z. B. Hochkonversion) genutzt werden. Eine Herausforderung ist die Herstellung großflächiger geordneter Strukturen. Wir haben dazu eine Prozesskette basierend auf Interferenzlithographie, Nanoimprintlithographie und Lift-Off aufgebaut und damit vielversprechende Ergebnisse erzielt.

Benedikt Bläsi, Hubert Hauser, **Sabrina Jüchter**, Volker Kübler, Sarah-Katharina Meisenheimer, Christine Wellens, Werner Platzer

5 Schematische Darstellung des Herstellungsprozesses von geordneten metallischen Nanopartikeln mit NIL- und Lift-Off-Prozessen. (1) Silikonstempelherstellung – wir verwenden einen zweilagigen Stempel aus einem weicherem Silikonblock als Untergrund und einer härteren Silikonschicht. (2) Strukturierung (Imprint) und Aushärten mit UV-Licht, (3) Substrat nach reaktivem Ionen-Ätzen (RIE), (4) Metallisierung, (5) Lift-Off.





Zur Herstellung geordneter plasmonischer Strukturen werden üblicherweise Lithographietechniken genutzt. Viele dieser Methoden sind auf kleine Flächen beschränkt, z. B. die Elektronenstrahlolithographie. Im Gegensatz dazu können wir mit Interferenzlithographie (IL) Strukturen auf einer Fläche von bis zu einem Quadratmeter erzeugen. Kombiniert man die IL mit einer Replikationstechnik wie Nanoimprintlithographie (NIL), ist die Prozesskette sehr flexibel und die Strukturen sind leicht und schnell reproduzierbar.

Zur Herstellung geordneter Nanostrukturen (Abb. 5) nutzen wir eine mit Interferenzlithographie hergestellte Masterstruktur. Von dieser Masterstruktur wird ein Silikonstempel abgeformt. Dieser wird in einen zuvor aufgetragenen Lack geprägt, der dann mit UV-Licht ausgehärtet wird. Nach dem Entformen wird das Substrat geätzt, wodurch die strukturierte Lackschicht bis auf das Substrat geöffnet wird. Im Anschluss wird die Struktur mit Silber metallisiert. Im letzten Schritt folgt ein Lift-Off (Ablösen) des Lacks. Nur die Partikel, die direkten Kontakt mit dem Substrat hatten, bleiben dabei haften.

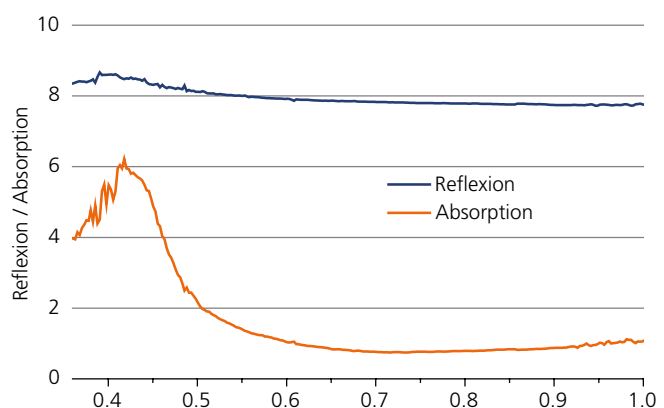
Mit unserer NIL-Prozesskette wurden die in Abb. 3/4 dargestellten Nanopartikel auf Flächen von 75 x 75 mm<sup>2</sup> und 100 x 100 mm<sup>2</sup> hergestellt. Die Silberpartikel zeigen einen plasmonischen Effekt in Form einer erhöhten Reflexion und Absorption zwischen 360 nm und 500 nm (Abb. 6).

Die gezeigte Prozesskette ist für die Herstellung geordneter metallischer Nanostrukturen geeignet. Zukünftig soll der Herstellungsprozess auf eine Fläche von 156 x 156 mm<sup>2</sup> erweitert werden, indem der einfache Imprintschritt durch einen Rollen-NIL Prozess ersetzt wird.

Das Projekt wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts »Nanosun II« gefördert.

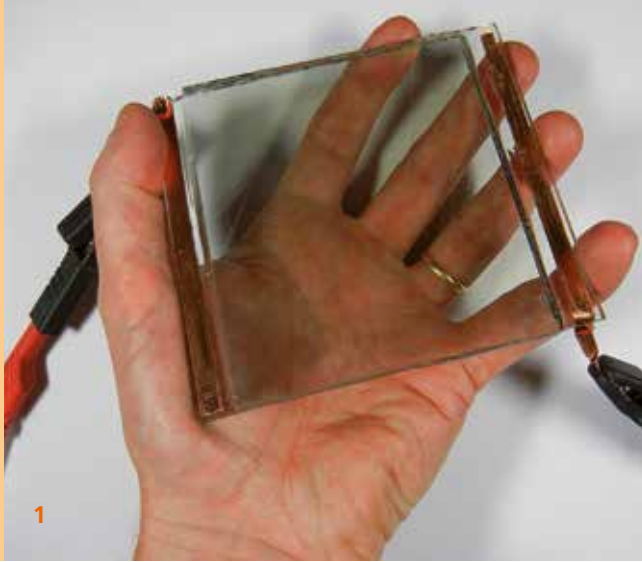
**1** Glassubstrat mit strukturiertem Lack (Abb. 5 Schritt 2) auf einer Fläche von 100 x 100 mm<sup>2</sup>.

**2–4** Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen der Masterstruktur in Photoresist (Abb. 2), eines erfolgreichen Lift-Off von Platin-Partikeln (Periode 1 μm, Ø 600 nm, Fläche 75 x 75 mm<sup>2</sup>) – mittig liegt verdreht ein Stück Lack (Abb. 3) – und Silber-Nanopartikel mit einer Periode von 300 nm und einem Durchmesser von ca. 150 nm auf einer Gesamtfläche von 100 x 100 mm<sup>2</sup> (Abb. 4).



**6** Optische Charakterisierung der Silber-Nanopartikel auf einem Glassubstrat. Dargestellt sind die mit einer integrierenden Kugel gemessene Reflexion sowie die berechnete Absorption ( $A=1-R-T$ ) über der Wellenlänge.

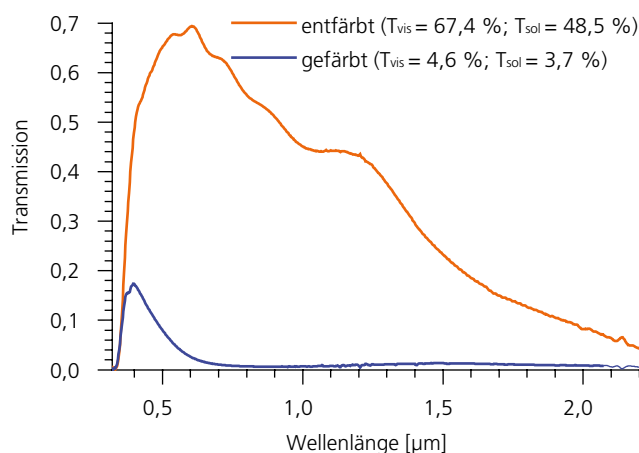




## ENTWICKLUNG VON ROBUSTEN MATERIALIEN FÜR PHOTOCHROME FENSTER

Die von uns entwickelten photochromen Fenstersysteme färben sich unter intensiver Sonnenbestrahlung ein und entfärben sich bei geringer Sonnenintensität wieder. Dadurch kann eine Überhitzung von Gebäuden mit hohem Verglasungsanteil vermieden werden. Aufgrund des einfachen Schichtaufbaus sind die Fertigungskosten gering. Die bisher eingesetzten Materialien weisen zum Teil eine begrenzte Beständigkeit gegenüber Wasser und Sauerstoff auf, was eine Versiegelung erforderlich macht. Um die Fertigungskosten zu senken, wollen wir Materialien entwickeln, die Wasser und Sauerstoff im System tolerieren. Dies ermöglicht auch den Einsatz von Foliensubstraten.

Shankar Bogati, **Andreas Georg**, Wolfgang Graf, Carmen Jerg, Helena Orvalho, Rishabh Raj, Werner Platzer



3 Transmission eines elektrochromen Systems mit neu entwickeltem Redoxelektrolyt im entfärbten (orange) und gefärbten (blau) Zustand.

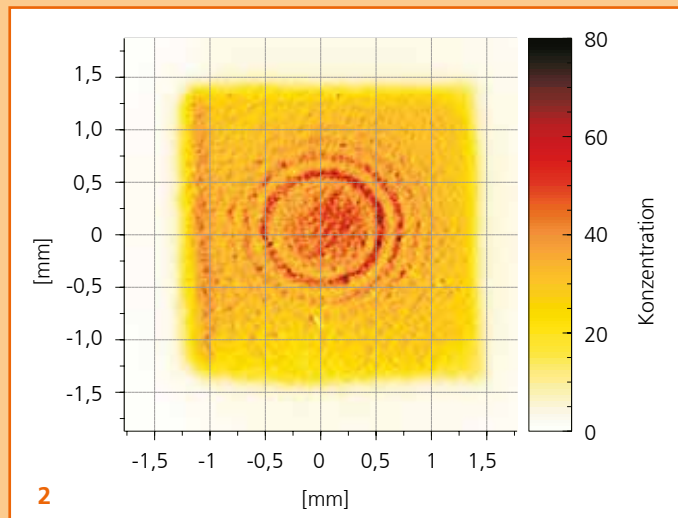
1 Elektrochromes System mit neu entwickeltem Redoxelektrolyt im entfärbten Zustand.

2 Elektrochromes System mit neu entwickeltem Redoxelektrolyt im gefärbten Zustand.

Das am Fraunhofer ISE entwickelte photochrome Fenstersystem basiert auf der Kombination einer Farbstoffsolarzelle mit elektrochromem Wolframoxid. Ein Farbstoff wird unter Beleuchtung angeregt und gibt ein Elektron über eine Titanoxidschicht an Wolframoxid ab, das sich von transparent zu blau verfärbt. Die Ladungskompensation erfolgt über einen Redoxelektrolyten, der Lithium-Ionen und ein Redoxpaar enthält. Das Redoxpaar gibt Elektronen an den Farbstoff ab, gleichzeitig gehen Lithium-Ionen aus dem Elektrolyt in das Wolframoxid über. Bisher wurden hier Jodid/Trijodid als Redoxpaar und ein Ruthenium-Komplex als Farbstoff eingesetzt. Beide Materialien tolerieren nur einen sehr kleinen Wasser- und Sauerstoffgehalt im Elektrolyten.

Die Aufnahme von Elektronen führt zur Entfärbung. In der Photovoltaik entspräche diese Rückreaktion einem Verlust, im photochromen System ist sie erforderlich. Für die photochromen Systeme können somit Materialien zum Einsatz kommen, die für die photovoltaische Anwendung ungeeignet sind. Dies betrifft neben dem Farbstoff auch das Redoxpaar.

In der Weiterentwicklung benötigen wir Materialien, die eine höhere Stabilität aufweisen, auch wenn sie in einer Solarzelle zu geringeren Wirkungsgraden führen würden. In einem Materialscreening wurden hierzu besonders geeignete Stoffe ausgewählt und in elektrochromen Teilsystemen getestet. Im Rahmen eines von der europäischen Union geförderten Projekts wird die Entwicklung bis zum kompletten photochromen System weitergeführt.



## SEKUNDÄROPTIK-CHARAKTERISIERUNG FÜR DIE KONZENTRIERENDE PHOTOVOLTAIK

**Großflächige Halbleiter sammeln das Sonnenlicht bei photovoltaischen Flachmodulen ein und wandeln es direkt in elektrische Energie um. Die konzentrierende Photovoltaik (CPV) senkt die Kosten, indem sie nur winzige Solarzellen verwendet und die große Fläche mit Optiken überdeckt, die das Licht fokussieren. Ein weiteres kleines optisches Bauteil direkt auf der Solarzelle kann die optische Konzentration weiter erhöhen und die Bestrahlung der Solarzelle homogenisieren. Mit diesen Sekundäroptiken ist es möglich, die Solarzellenfläche zu reduzieren und gleichzeitig den Wirkungsgrad zu erhöhen. An unserem Messplatz können wir Sekundäroptiken optisch charakterisieren. Dies ermöglicht Optimierungen ihrer Geometrie, der Herstellprozesse sowie Qualitätskontrollen.**

**Thorsten Hornung**, Peter Nitz, Tobias Schmid, Werner Platzer

CPV-Systeme konzentrieren das direkte Sonnenlicht mit einer großflächigen Optik, der sogenannten Primäroptik, auf kleine Solarzellen. Oft wird ein zweiter optischer Konzentrator, die sogenannte Sekundäroptik, direkt auf die Solarzelle montiert. Deren optische Eigenschaften können an unserem neu entwickelten Messplatz (Abb. 1) charakterisiert werden. Das Messsystem misst die optische Konzentration orts aufgelöst an der Austrittsapertur der Sekundäroptik (Abb. 2). In einem Konzentrator-Photovoltaiksystem würde sich dort die Solarzelle befinden, so dass die Messung direkt Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung der Zellbestrahlung im realen System ermöglicht.

Weil optische Konzentratoren keine abbildenden optischen Elemente sind, wirken sich Defekte teilweise deutlich anders auf die Funktion des Systems aus als in abbildenden Systemen.

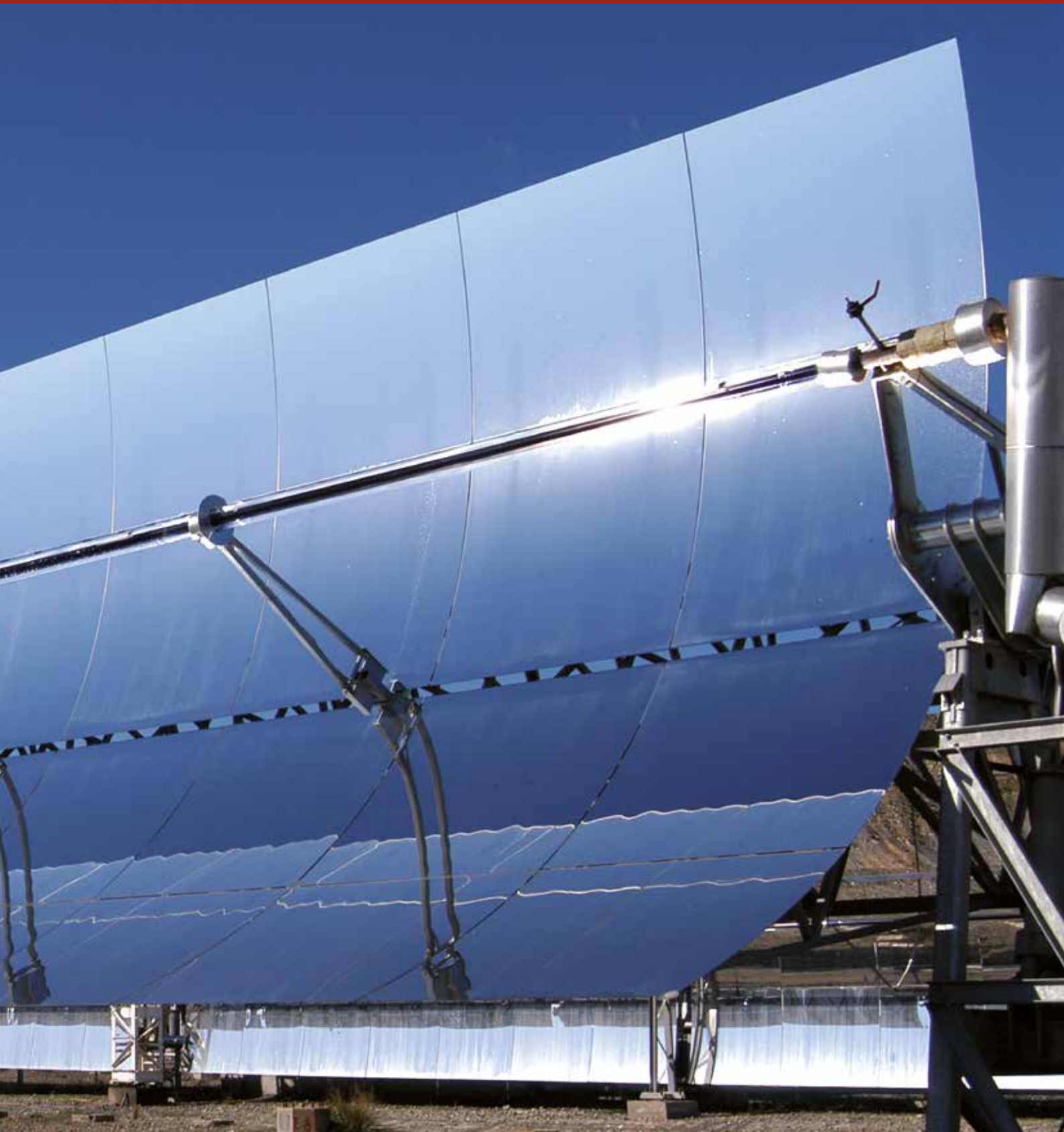
**1** Messaufbau zur Charakterisierung von Sekundäroptiken. Die Lichtquelle (oben im Bild) beleuchtet eine speziell angefertigte Fresnel-Linse (im Bild nicht vorhanden), die in diesem Aufbau als Primäroptik dient. Die zu vermessende Sekundäroptik wird mit einer Justier Vorrichtung im Brennpunkt der Fresnel-Linse platziert. Ein Schirm macht die Lichtverteilung an der Austrittsapertur der Sekundäroptik sichtbar und wird mit einer CCD-Kamera ab fotografiert.

**2** Gemessene Konzentrationsverteilung an der Austrittsapertur einer Sekundäroptik. Die Ringstruktur im Bild entsteht durch die Störflanken der Fresnel-Linse, die bei der Messung als Primärkonzentrator eingesetzt wurde. Die gemessene Konzentration ist durch den Messaufbau bedingt und muss für ein vollständiges Konzentratoren-system, abhängig von der eingesetzten Primäroptik, um einen Faktor 20–25 hochskaliert werden.

In der konzentrierenden Photovoltaik ist die Stromerzeugung das entscheidende Maß. Sie hängt sowohl von der auf die Solarzelle treffenden Strahlungsleistung als auch von deren räumlicher Verteilung ab – also genau den Größen, die von unserem Messsystem ermittelt werden. Somit liefert die optische Charakterisierung von Sekundäroptiken an unserem Messplatz eine gute Grundlage zur Ermittlung ihres Einflusses auf die Stromerzeugung. Vergleichende Messungen zeigen die Auswirkungen von Variationen in der Sekundäroptikproduktion. Die gewonnenen Erkenntnisse können eine Grundlage zur weiteren Verbesserung eines optischen Konzentratoren-systems darstellen.

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

**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 Kälteerzeugung bis hin zur seewasserfesten Entsalzungsanlage. Neuentwicklungen bei fassadenintegrierten Kollektoren oder Kollektoren mit kombinierter photovoltaischer Stromerzeugung erweitern das Angebot. 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 Temperaturerhebung 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. Betriebsfeste 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 Beschichtung

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 wie UHP-Beton und Kunststoff.

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 eingesetzt.

Prozesswärme in der Industrie wird auf sehr unterschiedlichen Temperaturniveaus in riesigen Mengen benötigt. Je nach Standort und Industrie werden daher unterschiedliche Solarfelder für die Erzeugung von Heißwasser, Dampf oder Heißluft 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. Im Gegensatz zu fluktuierenden Erzeugern wie PV und Wind lassen sich planbar Laufzeiten rund um die Uhr realisieren. Erreicht wird dies entweder über Hybridisierung (Verbindung mit brennstoffgebundenen Wärmerezeugern) oder über thermische Speicherung.





© DLR (CC-BY 3.0)

Die nichtsolare Wärmeerzeugung kann auch regenerativ über Biomasse geschehen. Normalerweise wird bei solaren Kraftwerken an Großprojekte von 20–400 MW<sub>el</sub> 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, Charakterisierungs- 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 cm<sup>2</sup>)
- 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<sub>el</sub>) 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 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**

---

<b>Thermische Solaranlagen</b>	Dr. Wolfgang Kramer	Telefon +49 761 4588-5096 wolfgang.kramer@ise.fraunhofer.de
--------------------------------	---------------------	--

---

<b>Energieeffiziente und solare Kühlung</b>	Dr. Doreen Kalz	Telefon +49 761 4588-5403 doreen.kalz@ise.fraunhofer.de
---	-----------------	--

---

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

---

<b>Solarthermische Kraftwerke</b>	Dr. Thomas Fluri	Telefon +49 761 4588-5994 thomas.fluri@ise.fraunhofer.de
-----------------------------------	------------------	---

---

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

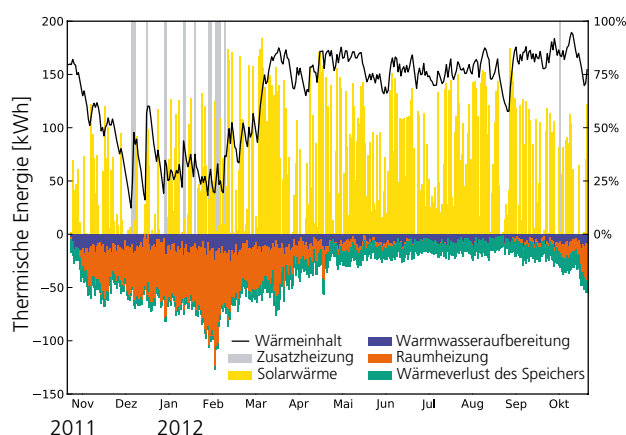
---



# MONITORING UND OPTIMIERUNG VON SOLARAKTIVHÄUSERN

Die Europäische Union fordert in der aktuellen Gebäude-richtlinie ab dem Jahr 2020 Fast-Nullenergiegebäude als Standard für Neubauten. Hierfür muss in erster Linie der Energiebedarf der Gebäude an konventionellen, primärenergetisch ungünstig bewerteten Energieträgern deutlich reduziert werden. Als SolarAktiv-Häuser werden hocheffiziente Gebäude bezeichnet, in denen mehr als 50 % der zur Raumheizung und Trinkwarmwasserbereitstellung erforderlichen Wärme solarthermisch direkt am Gebäude erzeugt wird. In einem Monitoring werden neun, den aktuellen Markt repräsentierende SolarAktivHäuser, messtechnisch umfassend untersucht und dabei simulationsgestützt Optimierungspotenziale abgeleitet.

Andreas Mayer, Axel Oliva, Gerhard Stryi-Hipp, Werner Platzer



2 Energiebilanz des thermischen Speichers in einem messtechnisch untersuchten Gebäude über ein Jahr. Insbesondere durch die in der Winterzeit erzielten Solarerträge kann die über das Zusatzheizsystem bereitzustellende Wärmemenge signifikant um ca. 75 % reduziert werden.

1 Projekt »HeizSolar«: messtechnisch untersuchtes Gebäude.

Für das Konzept des SolarAktivhauses ist die Erzeugung von Solarwärme gerade während der Heizperiode entscheidend, weshalb die eingesetzten thermischen Kollektoren nach Möglichkeit mit einem steilen Anstellwinkel nach Süden orientiert ausgeführt werden. Zielstellung ist die optimale Ausnutzung der auf das Gebäude auftreffenden Solarstrahlung primär durch aktive Maßnahmen. Entscheidend ist dabei, dass die im Bilanzraum erzeugte Energie auch in diesem gespeichert und verbraucht wird. Der Bezug an Energie über die Bilanzgrenze des Gebäudes kann dadurch signifikant reduziert werden. Für das Monitoring wurden aus mittlerweile ca. 1000 bestehenden SolarAktivhäusern neun Gebäude ausgewählt, die in ihrer Konstruktion und Anlagentechnik zur Wärmeversorgung die Bandbreite des bestehenden Marktes repräsentieren. Die in den betrachteten Gebäuden eingesetzten Warmwasserspeicher liegen im Bereich von Tages- bis hin zu wesentlich größeren Wochen- oder Saisonspeichern. Für das Laden der Speicher werden marktgängige Techniken wie sequenziell zuschaltbare, innenliegende Wärmetauscher oder Schichtladeeinrichtungen eingesetzt. Die Entladung der Speicher erfolgt in der Regel auf mehreren unterschiedlichen Höhen, so dass zielgerichtet eine Temperatur im Vorlauf eingestellt werden kann. Mit einer modellbasierten Messdatenanalyse werden Optimierungspotenziale in der Betriebsführung sowie Auslegungsempfehlungen und zukunftsweisende Entwicklungspfade für das vorgestellte Konzept erarbeitet.

Das Projekt »HeizSolar« wird teilweise aus Mitteln des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) sowie dem Projektträger Jülich gefördert.

[www.DieSolarHeizung.info](http://www.DieSolarHeizung.info)



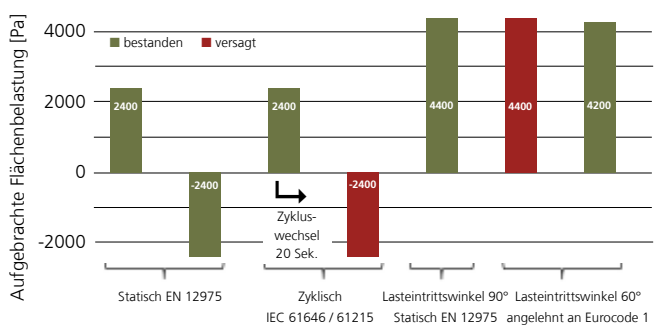
# UNTERSUCHUNGEN VON WIND- UND SCHNEELASTEN AN KOLLEKTOREN

Die europäische Norm Eurocode 1 (EN 1991) regelt die Anforderungen an Produkte bezüglich mechanischer Stabilität und Sicherheit aufgrund von Wind- und Schneelasten. Hersteller von solarthermischen Kollektoren müssen daher für ihre Produkte die Konformität mit dem Eurocode 1 sicherstellen. Die Produkte durchlaufen weiterhin einen Zertifizierungsprozess (z. B. Solar Keymark), um Leistungsfähigkeit und Qualität unabhängig zu prüfen. Mit enthalten ist eine mechanische Prüfung. Letztere ist jedoch bei weitem nicht hinreichend, um den Anforderungen des Eurocode 1 gerecht zu werden. Im Rahmen des Projekts »MechTest« wurde u. a. ein neuartiger Belastungsprüfstand entwickelt, um erweiterte Testverfahren auszuarbeiten.

**Konstantin Geimer**, Korbinian Kramer, Werner Platzer

Bisher werden gemäß den einschlägigen mechanischen Prüfungen nach der Kollektortestnorm EN 12975 nur statische senkrechte Belastungen, sowohl Druck als auch Zug, auf die Kollektorabdeckung durchgeführt. Zudem sind Zugbelastungen von Vakuumröhrenkollektoren bzw. deren Hinterspiegelungen bisher aufgrund der mangelnden Testmöglichkeit ausgenommen. Im Vergleich zu den Belastungszuständen des Eurocode 1 werden zyklische und asymmetrische Belastungen, verursacht durch Windböen oder ungleichmäßige Schneeanhäufung, nicht berücksichtigt. Ein großer Teil dieser realistischen Lastfälle sowie die Untersuchung des Temperatureinflusses auf die mechanische Stabilität können nun mit dem neuartigen Belastungsteststand untersucht werden (Abb. 1). Erste erweiterte Versuche an Referenzkollektoren zeigen teilweise signifikante Unterschiede gegenüber einer einfachen statischen Prüfung mit senkrechter Belastungsrichtung. In Abb. 2 sind die Ergebnisse erster Prüfungen an einem Referenzkollektortyp in Abhängigkeit des Prüfverfahrens dargestellt. Während der Kollektor die statische Prüfung nach

1 Neuer mechanischer Belastungsprüfstand eingebettet in eine Klimakammer. Der Teststand verfügt über vier Traversen bestückt mit jeweils sechs Pneumatikzylindern.



2 Es wurden Kollektoren des gleichen Typs (Referenzkollektor) mit unterschiedlichen Belastungsprozeduren und -arten getestet. Bei einer zyklischen Standardprüfung (PV-Prüfnorm) tritt Versagen auf, während dies bei den gleichen Werten und einer statischen Prüfung (ST-Prüfnorm) nicht der Fall ist. Die Belastungsgrenze reduziert sich um 5 %, wenn der Lasteintrittswinkel von 90° auf 60° verringert wird (Schublast).

EN 12975 besteht, versagt der Kollektor schon beim ersten Zykluswechsel bei Anwendung der Prüfnorm aus der PV-Branche IEC 61646/IEC 61215. Das Versagen trat nach einer Haltezeit des Drucks von einer Stunde und einem anschließenden Wechsel von +2400 auf -2400 Pa innerhalb von 20 Sekunden auf. In weiteren Arbeiten werden derzeit mit dem neuen mechanischen Prüfstand der Einfluss unterschiedlicher Temperaturen sowie die Auswirkungen auf unterschiedliche Kollektortypen untersucht.

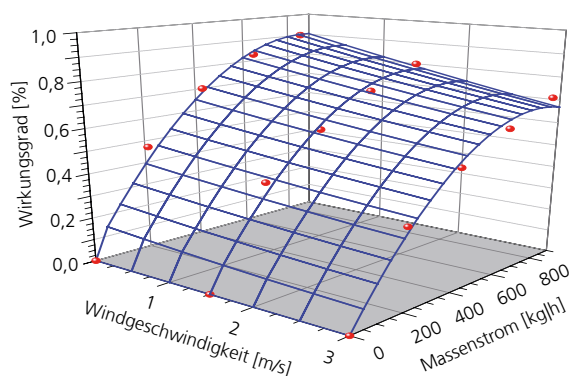
Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.



## VERMESSUNG VON LUFTKOLLEKTOREN OHNE TRANSPARENTE ABDECKUNG

Im Förderprojekt »Luko-E« wurden zusammen mit den Projektpartnern die Verfahren zum Testen von Luftkollektoren erarbeitet, welche die Grundlage einer internationalen Norm sein werden. Bislang existierte hierzu keine europäische Norm. Eine Förderung von Luftkollektoren war daher nur auf der Basis einer Sondervereinbarung mit dem Fördermittelgeber möglich. Wie bei wassergeführten Kollektoren wird auch bei den Luftkollektoren zwischen Kollektoren mit und ohne transparente Abdeckung unterschieden. Da in der ersten Projektphase nur die Kollektoren mit transparenter Abdeckung behandelt wurden, ist das Testen von Luftkollektoren ohne transparente Abdeckung der Schwerpunkt in der zweiten Projektphase.

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



2 Ergebnis einer Messung eines Luftkollektors ohne transparente Abdeckung im Sonnensimulator bei stabilen Windgeschwindigkeiten. Dargestellt sind rot die Wirkungsgrade über der Windgeschwindigkeit und den Massenstrom. Die Einstrahlung beträgt  $882,5 \text{ W/m}^2$ , die Eintrittstemperatur der Luft ist immer gleich der Umgebungstemperatur. Das blaue Gitternetz entsteht aus einer nichtlinearen Oberflächenanpassung.

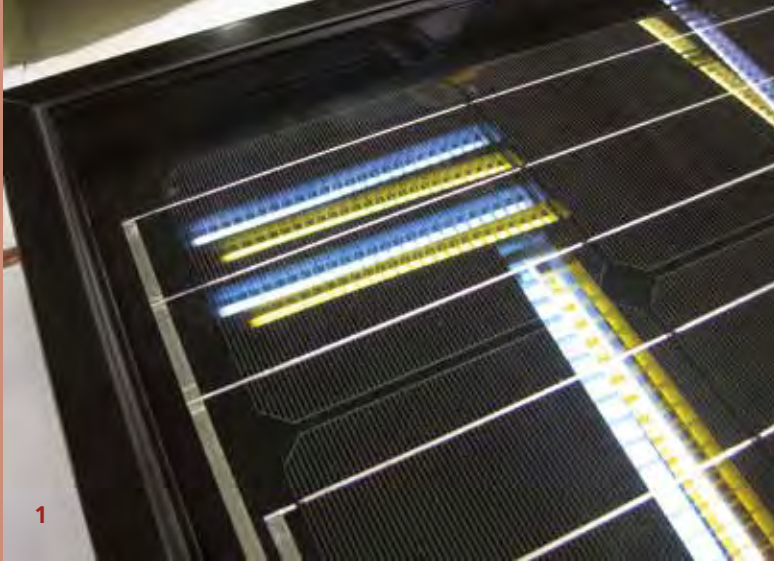
1 Kollektor mit überspannter Folie. Im unteren Bereich befinden sich Windgeneratoren, mit denen die Strömungsgeschwindigkeit über dem Absorber eingestellt werden kann. Zur vollständigen Charakterisierung sind Messungen mit und ohne Folie notwendig.

Luftkollektoren nutzen Luft als Wärmeträgermedium. Eine der Besonderheiten von Luftkollektoren ist die starke Abhängigkeit des Kollektorwirkungsgrads von der durchströmenden Luftmasse. Je höher die Strömungsgeschwindigkeit, desto besser ist bei gleichbleibender Dichte die Wärmeübertragung vom Absorber zum Wärmeträgermedium und demnach auch der Wirkungsgrad. Soll ein Luftkollektor vollständig charakterisiert werden, so müssen die Wirkungsgrade in Abhängigkeit von der Arbeitstemperatur und von verschiedenen Massenströmen bestimmt werden.

Zusätzlich ist bei einem Kollektor ohne transparente Abdeckung über dem Absorber eine hohe Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der Windgeschwindigkeit zu beobachten. Die Windgeschwindigkeit beeinflusst hierbei maßgeblich die konvektiven Wärmeverluste des Kollektors. Bei der Vermessung eines solchen Kollektors muss dafür gesorgt werden, dass die genannten Einflussgrößen reproduzierbar eingestellt sind und konstant bleiben.

Um unabgedeckte Luftkollektoren unter Freiluftbedingungen testen zu können, was notwendig wird, wenn z. B. die Baugröße das Testen unter dem Sonnensimulator nicht zulässt, wurde ein eigenständiger Teststand realisiert. Neben einer definierten Kollektoraufgabe verfügt der Teststand über einen Spannmechanismus für eine hochtransparente Abdeckung, die über den Kollektor gespannt werden kann und so einen Windkanal mit kontrollierten Strömungsbedingungen über der Absorberfläche bildet. Störgrößen wie schwankende Windgeschwindigkeiten, z. B. durch Windböen, werden so minimiert.





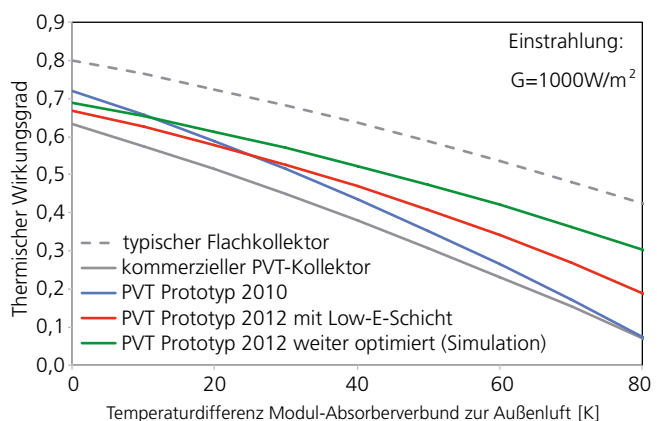
## OPTIMIERUNG EINES PV-THERMISCHEN HYBRID-KOLLEKTORS

Hohe Anteile Solarenergie an der Strom- und Wärmeversorgung in Deutschland erfordern eine effiziente Dachflächennutzung. »Abgedeckte« PV-Thermische (PVT)-Kollektoren, bei denen sich der Solarzellen-Absorberverbund in einem Kollektorgehäuse unter einer Glasplatte befindet, sind vielversprechend, da sie bis zu 50 % mehr Solarwärme und -strom pro Flächeneinheit bereitstellen können als separate PV-Module und Solarthermiekollektoren. Bisher verfügbare PVT-Kollektoren weisen allerdings keine zufriedenstellende Effizienz auf. Das Fraunhofer ISE entwickelt daher optimierte abgedeckte PVT-Kollektoren und konnte jetzt durch Integration einer neu entwickelten Low-e-Schicht eine deutliche Effizienzsteigerung erreichen.

Stefan Fortuin, Wolfgang Graf, Ingrid Hädrich, Thomas Kroyer, **Gerhard Stryi-Hipp**, Martien Wiese, Werner Platzer

PVT-Kollektoren weisen prinzipiell einen etwas geringeren Wirkungsgrad in der Strom- und Wärmeerzeugung im Vergleich zu separaten PV-Modulen und Solarthermiekollektoren auf. Ihr Einsatz ist deshalb nur dann sinnvoll, wenn die verfügbare Fläche begrenzt ist und sie auf dieser Fläche einen deutlich höheren Gesamtenergieertrag erzielen. Abgedeckte PVT-Kollektoren sollen Solarthermiekollektoren ersetzen und Trinkwarmwasser auf über 60 °C erwärmen. Dies ist bislang nur im Sommer möglich, denn bei höheren Temperaturdifferenzen zwischen Modul-Absorberverbund und Außenluft ist ihr Wirkungsgrad zu gering, da sie keine spektralselektive Absorberschicht besitzen. Zur Trinkwassererwärmung benötigen Einfamilienhäuser nur eine Kollektorfläche von etwa 5 m<sup>2</sup>, weshalb PVT-Kollektoren keinen signifikanten Vorteil aufweisen. Relevant wird ihr Gesamteffizienzvorteil bei größeren Kollektorflächen, die für die Heizungsunterstützung (etwa 12 m<sup>2</sup>) oder für SolarAktivHäuser erforderlich sind (über 30 m<sup>2</sup>).

1 Ausschnitt des PVT-Prototypkollektors mit Spiegelungen an der antireflex-beschichteten Abdeckscheibe (blau) und der Low-e-beschichteten Abdeckung des Modul-Absorberverbunds (gelb).

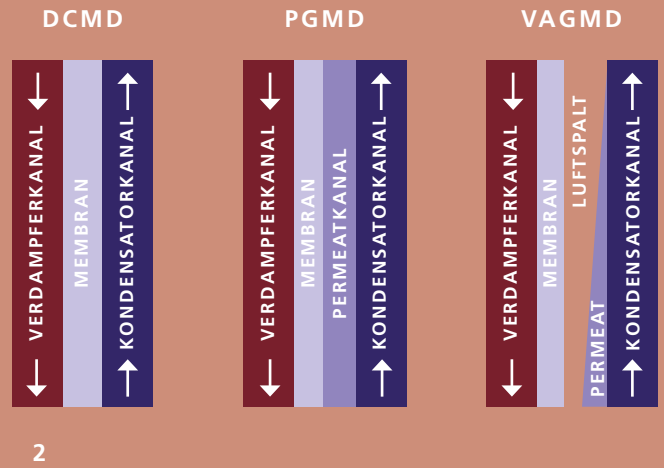
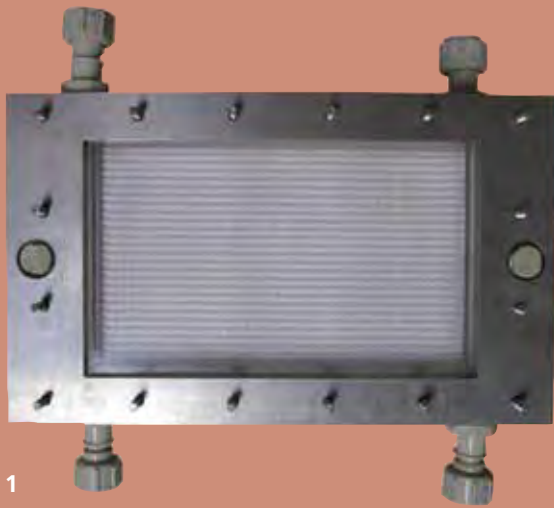


2 Thermische Wirkungsgradkennlinien eines kommerziellen PVT-Kollektors und dreier Prototypen im MPP-Modus im Vergleich zu einem typischen Flachkollektor. Die Differenz der grünen und der gestrichelten Linie wird vornehmlich durch die zusätzliche Stromproduktion verursacht.

Heizungsunterstützung erfordert die Erhöhung des PVT-Kollektorwirkungsgrads bei höheren Temperaturdifferenzen. Deshalb wurde am Fraunhofer ISE eine Low-e-Schicht auf der Glasabdeckung der Solarzellen aufgebracht, die die Infrarotstrahlung reduziert. Da die Low-e-Schichten für Wärmeschutzverglasungen aufgrund mangelnder Transparenz für das Sonnenspektrum nicht geeignet sind, wurde eine spezielle Low-e-Schicht auf Silber-Basis entwickelt und probeweise hergestellt. Damit konnte in einem PVT-Prototypkollektor bei einer Temperaturdifferenz von 60 °C die Effizienz um 25 % erhöht werden.

Die Arbeiten wurden von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gefördert.

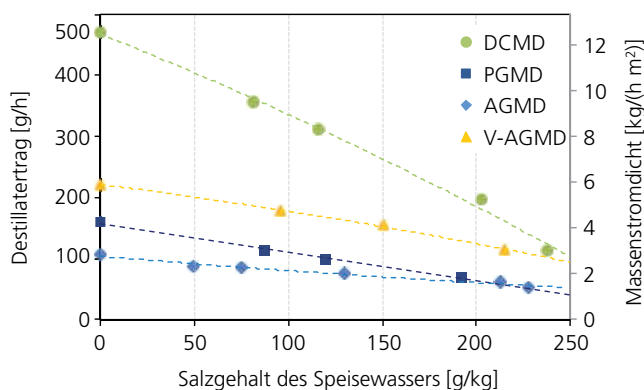




# BETRIEB VON MEMBRANDESTILLATION MIT NIEDERTEMPERATURWÄRMEQUELLEN

Die Aufbereitung von Meer- und Brackwasser ist heute in vielen Ländern ein elementarer Bestandteil der Trinkwasserversorgung. Neben den etablierten Großtechnologien gewinnt der Einsatz dezentraler Anlagen zunehmend an Bedeutung. Auch die energieeffiziente und nachhaltige Aufbereitung industrieller Abwässer gewinnen an Aufmerksamkeit. Steigende Energiekosten, zunehmende Umweltauflagen und weitere gesetzliche Regelungen machen die Entwicklung neuer Technologien notwendig. Dazu werden am Fraunhofer ISE Forschungsarbeiten zur Membrandestillation durchgeführt, einem Verfahren, das zur Trennung unterschiedlichster Stoffsysteme eingesetzt wird. Dieses eignet sich besonders für einen Betrieb mit Niedertemperaturabwärme oder Solarthermie.

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

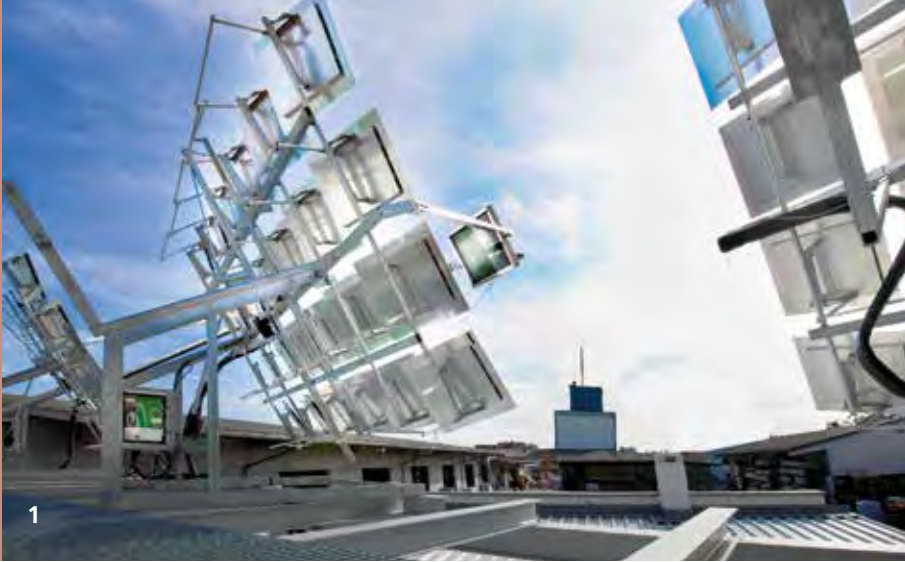


3 Vergleichende experimentelle Untersuchungen zu verschiedenen Membrandestillationsverfahren. Die Untersuchungen dienen der Beurteilung der Sensitivität der Prozesse gegenüber der Menge an gelösten Salzen in der Sole.

1 Membrantestzelle für grundlagenorientierte Untersuchungen zur Membrandestillation.

2 Varianten der Membrandestillation, die in der Membrantestzelle konfiguriert werden können: »Direct Contact (DCMD)«-Verfahren, bei dem die Membran direkt den Verdampfer- vom Kondensatorkanal trennt, sowie »Permeat-Gap (PGMD)«, »Air-Gap (AGMD)«- und »Vakuum-Air-Gap (VAGMD)«-Verfahren, bei denen eine zusätzliche Folie den Destillatraum vom Kondensatorkanal trennt.

Die Membrandestillation (MD) ist ein thermisches Trennverfahren, bei dem eine Verdampfung durch eine Membran hindurch stattfindet. Die flüssige Sole wird von der semipermeablen Membran zurückgehalten, während Wasserdampf hindurchtreten kann. Als Triebkraft dient eine Temperaturdifferenz zwischen den beiden Grenzflächen der Membran. Am Fraunhofer ISE werden MD-Module und Systeme zur Entsalzung sowie zur Trennung anderer Stoffsysteme entwickelt. Zur Optimierung der eingesetzten Materialien, des Kanalaufbaus und zur Identifikation effizienter Betriebspunkte werden experimentelle Untersuchungen an Testzellen im Labormaßstab durchgeführt. Hierbei steht die vergleichende Analyse unterschiedlicher Verfahrensvarianten im Vordergrund. Eine Vielzahl von Membranzustellungen konnte mit der Testzelle in Kooperation mit Industriepartnern charakterisiert werden. Das Trennverhalten der MD für verschiedene Medien wurde untersucht. Durch die Entwicklung und Validierung eines sehr umfangreichen Simulationswerkzeugs, das auf einem physikalischen Mehrknotenmodell beruht, ist es uns gelungen, Membrandestillationsmodule für verschiedenste Kapazitäten und Anwendungen auszulegen. Das Modell wird auch bei der Auslegung komplexer Gesamtsysteme, z. B. solar betriebener Entsalzungsanlagen, verwendet. Für den Bau von Membrandestillationsfeldsystemen haben wir Anlagen zur Herstellung und Charakterisierung von Membrandestillationsmodulen im Labor aufgebaut. Es wurden bereits über 150 Module produziert und experimentell untersucht.



1

© Isomorph

# VERMESSUNG VON KONZENTRIERENDEN NACHGEFÜHRTEN KOLLEKTOREN

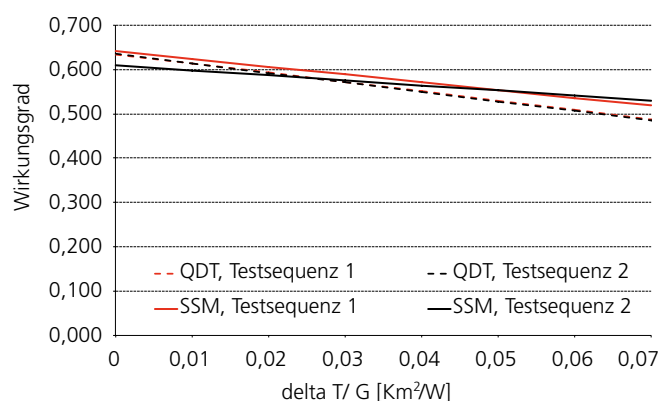
Immer mehr Hersteller von thermischen Solarkollektoren sehen die industrielle Prozesswärme als Zukunftsmarkt und nehmen entsprechende Produkte in ihr Portfolio auf. Auch die Bundesregierung hat die Bedeutung dieses Sektors erkannt und in der letzten Revision des Markt-anreizprogramms die Förderung solcher Anlagen deutlich erhöht. Bei höheren Prozesstemperaturen eignen sich besonders konzentrierende Kollektoren für diese Anwendungen. Der wachsende und sich diversifizierende Markt für solche Kollektoren zieht einen erhöhten Prüfbedarf nach sich. Das TestLab Solar Thermal Systems hat dieses Jahr erstmals einen konzentrierenden Kollektor nach dem stationären und dem quasi-dynamischen Verfahren der europäischen Norm charakterisiert.

**Sven Fahr**, Stefan Hess, Korbinian Kramer, Stefan Mehnert, Werner Platzer

Der Bereich der konzentrierenden Kollektoren umfasst ein viel breiteres Technologiespektrum als das der Flach- und Vakuumröhrenkollektoren. Sie unterscheiden sich stark in der Konstruktion ihrer Receiver, der Konzentratoren sowie im Konzept der Sonnennachführung. Deshalb ist die zuverlässige Bestimmung des Einflusses von Diffusstrahlungsanteil und Einstrahlwinkel (IAM) auf die thermische Leistung für eine allgemeingültige Charakterisierung, und damit für aussagekräftige Ertragsprognosen, von zentraler Bedeutung.

Die Charakterisierung von konzentrierenden Kollektoren wirft besondere Fragen auf und erfordert die Überprüfung der etablierten Prüfverfahren. Im Versuch konnte gezeigt werden, dass das stationäre Messverfahren (SSM) in seiner jetzigen Form nicht geeignet ist, um konzentrierende Kollektoren ausreichend zu beschreiben, da es die Diffusstrahlungsakzeptanz nicht berücksichtigt. Das quasi-dynamische Messverfahren (QDT) beschreibt diesen Parameter und bietet zudem die

1 Am Fraunhofer ISE charakterisierter Linearspiegel der Firma Isomorph.



2 Die Grafik zeigt für beide Messverfahren die Wirkungsgradkennlinien bei 1000 W/m<sup>2</sup> basierend auf zwei Auswertungen für verschiedene Testsequenzen mit unterschiedlichen Wetterbedingungen. Das stationäre Verfahren (SSM) liefert für unterschiedliche Diffusstrahlungsanteile stark abweichende Ergebnisse, während das Ergebnis des quasi-dynamischen Verfahrens reproduzierbar ist (QDT).

Möglichkeit, unbekannte biaxiale IAM-Verläufe mittels erweiterter multilinearer Regression zu bestimmen. Im Experiment konnten mit diesem Messverfahren im Einzelfall bereits sehr gute und reproduzierbare Ergebnisse erzielt werden (Abb.2). Auch die Betriebssicherheit des Kollektors haben wir unter Berücksichtigung der kommenden Normrevision durch Funktionsprüfungen nachgewiesen. Nach erfolgreichem Abschluss der Prüfungen konnte mit dem von isomorph s.r.l. entwickelten Linearspiegel (Abb. 1) zum ersten Mal ein konzentrierender Kollektor durch das Fraunhofer ISE zur Zertifizierung vorgeschlagen werden.



## BESCHLEUNIGTE ALTERUNGSTESTS FÜR SOLARTHERMISCHE KOLLEKTOREN

**Sonnenkollektoren sind die am stärksten belasteten Komponenten einer thermischen Solaranlage, da sie neben hohen Temperaturen auch Belastungen wie UV-Strahlung, Wind, Salz, Staub und Feuchtigkeit standhalten müssen. Für die Quantifizierung des Alterungsverhaltens von solarthermischen Kollektoren und deren Komponenten werden von der Gruppe »Gebrauchsdau-eranalyse« des Fraunhofer ISE Sonnenkollektoren an Standorten mit Extremklimaten exponiert, um angepasste Prüfungen entwickeln und validieren zu können.**

Markus Heck, Thomas Kaltenbach, Matthis Reinke Kurth, Sandrin Saile, **Karl-Anders Weiß**, Harry Wirth

Die Freibewitterungsstandorte zeichnen sich durch typische Kombinationen verschiedener Belastungsfaktoren aus, z. B. hohe UV-Strahlung mit mechanischen Wind- und Schneelasten am Standort Zugspitze oder starke Einstrahlungen bei hohen Temperaturen und großen Tag-Nacht-Unterschieden am Wüstenstandort in Israel. Am maritimen Standort auf Gran Canaria treten neben einer hohen Luftfeuchtigkeit mit hohem Gehalt an Salz-Aerosolen beträchtliche Windlasten auf (Abb. 1). Durch die Kombination dieser Faktoren zeigt sich auf den Prüfmustern schon nach wenigen Tagen ein »Klebefilm«, der angetragenen Sand zu einer Schmutzschicht auf dem Prüfgut verklebt. Der seltene Regen kann diese Verkrustungen nicht mehr vollständig abwaschen, so dass sie mechanisch entfernt werden müssen. Seitens der Hersteller und der Betreiber besteht deshalb ein großes Interesse, die Funktionalität von schmutzabweisenden oder selbstreinigenden Oberflächen zu überprüfen.

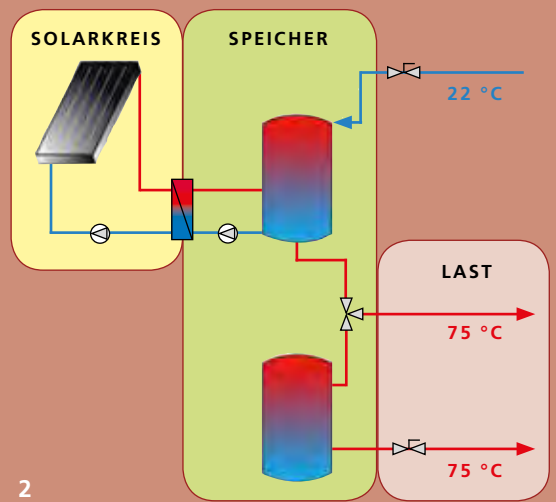
Daher wurden u. a. schmutzabweisende Beschichtungen von Glasabdeckungen auf deren Wirkung und Beständigkeit gegenüber auftretenden Witterungseinflüssen untersucht.

1 *Exponierte Kollektoren auf dem Teststand des Fraunhofer ISE am maritimen Freibewitterungsstandort auf dem Gelände des Instituto Tecnológico de Canarias, Pozo Izquierdo, Gran Canaria.*

Hierzu wurde ein Verfahren entwickelt, das die reproduzierbare Beschmutzung der Prüflinge mit Normstäuben erlaubt. Um die Stabilität der Schichten zu testen, wurden ausgewählte Prüflinge verschiedenen Alterungsprüfungen unterzogen (85 °C mit und ohne UV-Strahlung). Die Degradation der schmutzabweisenden Funktionalität wurde mittels Transmissions- und Kontaktwinkelmessungen sowie durch den entwickelten Beschmutzungstest untersucht. Es zeigten sich große Unterschiede in der Leistungsfähigkeit und Beständigkeit. Aktuell wird das Testverfahren weiterentwickelt. Ebenso werden weitere Gläser und Beschichtungen untersucht.

Die Arbeiten werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) sowie Partnern aus der Industrie im Rahmen des Projekts »SpeedColl« unterstützt.

[www.speedcoll.de](http://www.speedcoll.de)



# MARKT UND SYSTEMTECHNIK FÜR SOLARE PROZESSWÄRME IN INDIEN

Mit seinem hohen solaren Strahlungsangebot und seiner schnell wachsenden Wirtschaft ist Indien ein vielversprechender Markt für solare Prozesswärme. Trotz gesetzlicher Verpflichtungen und der Förderung thermischer Solaranlagen wächst der Markt für dieses Anwendungsfeld dort aber nur langsam. In Zusammenarbeit mit der GIZ Indien haben wir auf Basis unserer Erfahrungen im Bereich solarthermischer Technologie- und Marktentwicklung in Europa, die Möglichkeiten und Rahmenbedingungen des Transfers deutscher Solarthermie-Technologie nach Indien zur Bereitstellung solarer Prozesswärme bewertet. Anhand einzelner Anlagen haben wir die europäische Systemtechnik mit Lösungen indischer Anbieter verglichen und eine Befragung von Marktteilnehmern in Indien durchgeführt.

**Annabell Helmke**, Stefan Heß, Deepthaa Sampath Kumar, Gerhard Stryi-Hipp, Werner Platzer

Gegenwärtig hat Solarthermie in Indien teilweise ein negatives Image, weil fehlerhafte Auslegung, Betriebsführung und Wartung in der Vergangenheit dazu geführt haben, dass die Funktionsfähigkeit und Lebensdauer der Anlagen nicht den Erwartungen entsprachen. Im Rahmen der Erarbeitung von Maßnahmen für eine verbesserte Marktentwicklung haben

Faktoren	Deutschland	Indien
Jährlich Einstrahlung kWh/m <sup>2</sup> /a	ca. 1140 Freiburg ca. 970 Bremen	ca. 2370 Jaipur ca. 1640 Neu-Delhi
Systeme druckbeaufschlagt	üblich	nicht üblich
Medium Solarkreis	Wasser-Glykolkemisch	Wasser
Regelung	komplex	einfach
Elektronische Ertragsüberwachung	häufig	selten

3 Faktoren Technologietransfer Solare Prozesswärme.

1 Prozesswärmanlage mit 150 m<sup>2</sup> Flachkollektoren und 6,5 m<sup>3</sup> Pufferspeicher in Neu Delhi. Puffer wird an Tag 1 beladen und abends manuell in den Nachheizspeicher entladen, der während Tag 2 in vier Einheiten bei 75 °C entladen wird.

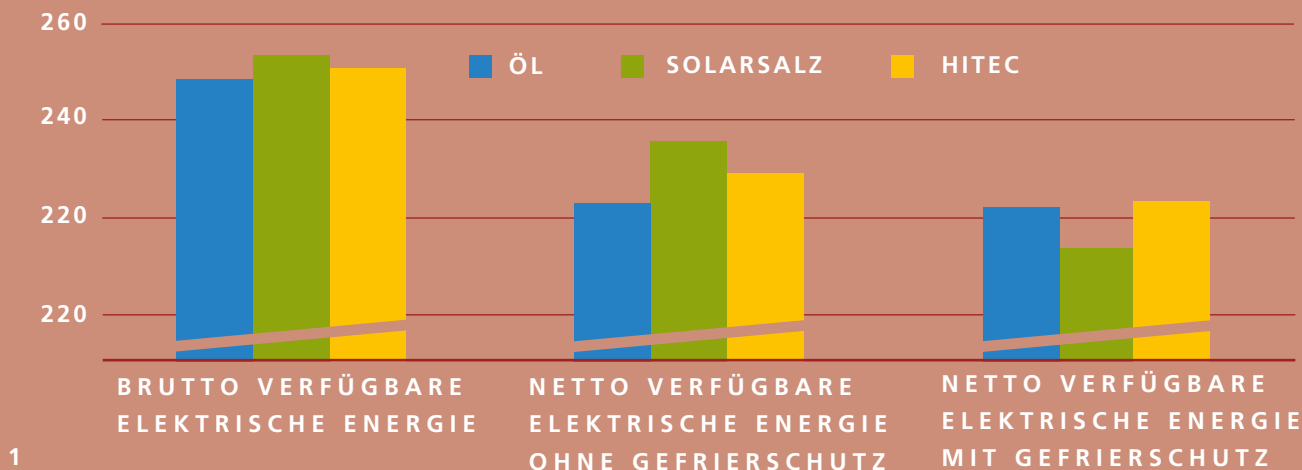
2 Schema der drucklosen Beispielanlage mit Solarkreis, Puffer- und Nachheizspeicher (inklusive elektrischer Heizregister). Zwischen den Speichern befindet sich eine Höhendifferenz von ca. 10 m.

wir neben wirtschaftlichen und förderrechtlichen Rahmenbedingungen auch gängige Planungspraktiken und verfügbare Systemtechnik in Indien analysiert und bewertet. Es bestehen wesentliche Unterschiede zwischen Deutschland und Indien, die für einen Technologie- und Wissenstransfer berücksichtigt werden müssen. Der europäische Stand der Technik lässt sich nur bedingt auf Indien übertragen, weil hier andere Anforderungen an Komponenten, Systemtechnik, Auslegung, Regelung und Betriebsführung gestellt werden.

Charakteristisch für die lokale Ausführung ist ein solares Prozesswärme-System für einen Pharmakonzern in Neu Delhi (Abb. 1). Auf Wunsch des Anlagenbetreibers wurde von den Anbietern gezielt eine einfache Regelstrategie eingesetzt. Den Zuschlag erhielt ein kostengünstiges, druckloses System (Abb. 2) mit solarem Vorwärmerspeicher, dessen Inhalt am Ende jedes Tages manuell in einen schon bestehenden elektrischen Nachheizspeicher geleitet wird. Wir haben die im Rahmen der Ausschreibung eingereichten Angebote bewertet, Verbesserungen an Regelung und Systemtechnik vorgeschlagen und ein Monitoringkonzept erstellt.

Das Zwischenergebnis dieser Arbeiten zeigt, dass eine deutlich verbesserte Marktentwicklung solarer Prozesswärme in Indien nur möglich ist, wenn die spezifischen Anforderungen an Systemtechnik und Betriebsführung bekannt sind, um angemessene Optimierungen unter Berücksichtigung landesspezifischer Gegebenheiten vorzunehmen.





## BEWERTUNG VON PARABOLRINNEN-KRAFTWERKEN MIT SALZSCHMELZE-KREISLAUF

Als neue Wärmeträgerfluide in solarthermischen Kraftwerken werden eutektische Mischungen von Salzschnmelzen vorgeschlagen, mit denen die Betriebstemperatur der Solarfelder gegenüber dem jetzt verwendeten Thermoöl deutlich erhöht werden kann. Höhere Dampftemperaturen im Verdampfer und Überhitzer können dann zu höheren thermodynamischen Wirkungsgraden im Kraftwerksblock führen. Dieses ist ein positiver Faktor, der zu besserer Wirtschaftlichkeit von Parabolrinnen oder Fresnelkraftwerken führen kann. Negative Faktoren sind dagegen die eventuell höheren Kosten zur Verhinderung des Einfrierens der Salzschnmelzen im Betrieb und der Korrosion.

Florian Boess, Raymond Branke, Thomas Fluri, **Werner Platzer**

Salzschnmelze wird bereits versuchsweise in Parabolrinnen auf Sizilien erfolgreich verwendet. Um das Einfrieren des Fluids unterhalb der Schmelztemperatur zu verhindern, wird bei Auskühlung eine elektrische Begleitheizung zugeschaltet. Je nach Schmelztemperatur des Fluids ist dies früher oder später notwendig. Damit ist auch der parasitäre Energieverbrauch unterschiedlich, der obendrein von den hydraulischen Druckverlusten abhängt, welche die Pumpenergie bestimmen. Der Bereich der Betriebstemperaturen des Thermoöls liegt bei 20–390 °C, von Solarsalz (Mischung 40 %  $\text{KNO}_3$ /60 %  $\text{NaNO}_3$ ) bei 260–560 °C und bei 150–540 °C für kommerzielles HITEC®-Salz.

Um den parasitären Energiebedarf abschätzen zu können, wurde ein Modellkraftwerk des Typs ANDASOL 3 simuliert. Hierbei handelt es sich um ein Parabolrinnenkraftwerk mit 500 000 m<sup>2</sup> Aperturfläche und einer 50 MW Turbine sowie Speicherung. Der nominelle thermodynamische Wirkungsgrad des Dampfkreislaufs erhöht sich wegen der höheren Dampftemperatur von 34,5 % im Falle des Thermoöls auf 39,7 %

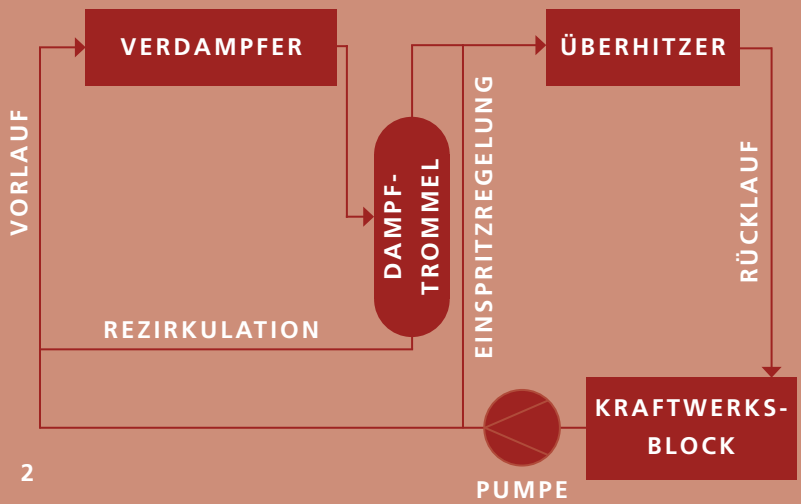
1 Vergleich der erzeugten elektrischen Brutto- und Nettoenergie mit und ohne Einfrierschutz durch Begleitheizung bei drei Standardwärmeträgern Therminol VP1 (Thermoöl), Solarsalz  $\text{KNO}_3/\text{NaNO}_3$  und Hitec®.

bei Solarsalz. Bei der Simulation des Abkühlverhaltens im Falle des nächtlichen Stillstands bzw. bei sehr niedrigen Einstrahlungsbedingungen ist es absolut notwendig, in der Simulation nicht Stundenwerte quasistationär zu verwenden, sondern das Auskühlverhalten mit Wärmekapazitäten dynamisch mit kurzen Zeitschritten zu beobachten. Dafür haben wir unser Simulationsmodell »ColSim« so erweitert, dass Salzschnmelze-Kreisläufe dynamisch simuliert werden können. Ebenso werden Speicher, Solarfelder und Dampfkreisläufe abgebildet.

Für Standorte mit geringer Direktnormalstrahlung (DNI) haben wir hohe parasitäre Energieverbräuche durch die notwendige Begleitheizung gefunden (Abb. 1). Deswegen sind in den untersuchten Fällen die Nettoenergiegewinne unter Berücksichtigung der Begleitheizung mit Thermoöl und dem kommerziellen HITEC®-Salz deutlich höher als bei der Solarsalzmischung. Der Nettoenergieertrag für Solarsalz ist dann 4,3 % niedriger als bei Thermoöl, während er mit 16,8 % für HITEC®-Salz 0,4 % höher ist. Die Absenkung des Schmelzpunktes des Flüssigsalzes erscheint daher für eine optimale Verwertung notwendig. Für eine umfassende Bewertung müssen aber auch andere Faktoren, z. B. Kosten, berücksichtigt werden. Diese liegen für Salz als Wärmeträger niedriger als bei Thermoöl. Auch werden andere Mechanismen zur Verhinderung der Erstarrung untersucht.

Das Projekt wird von der Europäischen Union im 7. Rahmenprogramm gefördert.





# OPTIMIERUNG DER FRISCHDAMPFPARAMETER IN EINEM LINEAREN FRESNELKRAFTWERK

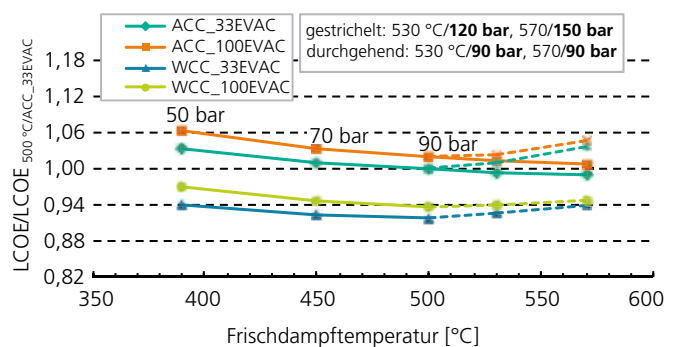
Bei der Entwicklung von solarthermischen Kraftwerkstechnologien ist ein Trend hin zu höheren Solarfeldtemperaturen zu beobachten. Das Ziel sind geringere Stromgestehungskosten. Einerseits kann der thermodynamische Wirkungsgrad des Kraftwerksblocks gesteigert werden. Andererseits fallen höhere Komponentenkosten an und die thermischen Verluste im Solarfeld werden erhöht. Zur Optimierung der Frischdampfparameter hinsichtlich minimaler Stromgestehungskosten haben wir ein direktverdampfendes lineares Fresnelkraftwerk als Modell in der Fraunhofer ISE eigenen Software ColSim implementiert und mit einem Kostenmodell verknüpft. Damit konnten wir für verschiedene Standorte und Kraftwerkskonzepte Optimierungen durchführen.

Thomas Fluri, Simon Lude, Werner Platzer

Die Simulationsumgebung ColSim bietet die Möglichkeit, hydraulische Kreise im dynamischen Modell abzubilden. Damit ist es uns möglich unterschiedliche Betriebsstrategien, neue Technologien und Kraftwerkskonzepte zu simulieren und deren Einfluss auf Ertrag oder Betriebsstabilität auch im Kurzzeitverhalten zu bewerten.

Das für diese Studie entwickelte Modell basiert auf der Technologie der Novatec Solar GmbH. Das Solarfeld ist in eine Verdampferstrecke und eine Überhitzerstrecke aufgeteilt. Dazwischen befindet sich eine Dampftrommel, um die Flüssig- von der Gasphase zu trennen. Optional wird der Kraftwerksblock trocken oder nass gekühlt. Für das Solarfeld stehen ein luftstabiler Absorber und ein Vakuumabsorber zur Verfügung. Der Einfluss der verschiedenen Absorbertypen in beiden wurde für vier Standorte untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass sich eine höhere Frischdampf Temperatur über den gesamten untersuchten Temperaturbereich positiv auf die Stromgestehungskosten auswirkt, jedoch nur, wenn oberhalb

- 1 Kollektorfeld des linearen Fresnelkraftwerks PE2 der Novatec Solar GmbH in Spanien.
- 2 Blockschaubild des implementierten ColSim-Modells eines linearen Fresnelkraftwerks.

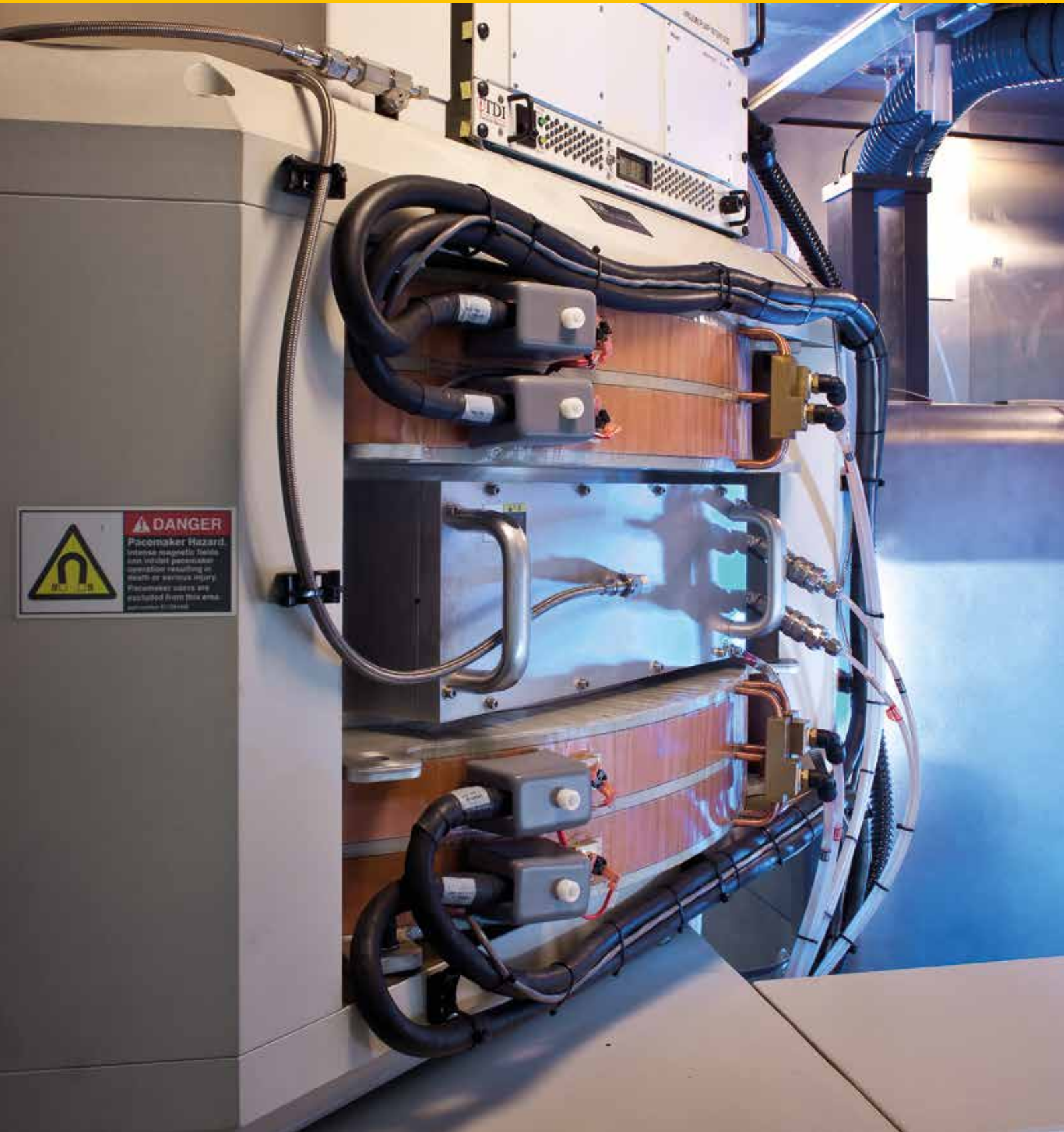


- 3 Berechnete relative Stromgestehungskosten für den Standort Daggett: Optional Trocken- (ACC) oder Nasskühlung (WCC) sowie Vakuumabsorber nur in der Überhitzerstrecke (33EVAC) oder im kompletten Feld (100EVAC).

500 °C der Frischdampfdruck bei 90 bar gehalten wird. Der positive Effekt bei den Stromgestehungskosten ist unterhalb 500 °C mit durchschnittlich 3,0 % / 100 °C deutlicher ausgeprägt als oberhalb 500 °C mit 1,7 % / 100 °C. Wird der Frischdampfdruck weiter erhöht, wirkt sich der zusätzliche Materialaufwand negativ aus. Die Vorteile von Nasskühlung gegenüber Trockenkühlung und der Vorteil des Einsatzes von luftstabilen Absorbentypen gegenüber Vakuumabsorbentypen in der Verdampferstrecke sind ersichtlich.

Die Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

# STROM AUS SONNENLICHT



# SILICIUM-PHOTOVOLTAIK

Die Silicium-Photovoltaik hat nach Jahren des erfolgreichen Wachstums weltweit eine Produktionskapazität von ca. 60 GWp erreicht. Das Marktvolumen für Si-basierte Module lag 2012 dagegen bei ca. 30 GWp. In der Folge sind die Modulpreise teilweise unter die Herstellungskosten gefallen und für einige Betriebe im In- und Ausland führte die damit verbundene ökonomische Herausforderung in die Insolvenz. Das Jahr 2012 war somit von einer industriellen Krise geprägt. Unsere FuE-Angebote zielen nun darauf ab, gemeinsam mit der Industrie neue innovative Produkte in den Markt zu überführen, so dass die Herstellungskosten gesenkt werden können und die PV-Industrie in Deutschland und Europa kompetitiv produzieren kann.

Rund 90 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. Mit unseren FuE-Angeboten bilden wir die gesamte Wertschöpfungskette der kristallinen Silicium-Photovoltaik ab.

Die PV-Materialplattform des Fraunhofer ISE mit dem Silicium Material Technologie und Evaluationscenter SIMTEC in Freiburg, dem gemeinsam mit dem Fraunhofer IISB betriebenen Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM in Freiberg sowie dem Fraunhofer-Center für Silicium-Photovoltaik CSP in Halle, das gemeinsam mit dem Fraunhofer IWM betrieben wird, deckt alle Forschungsthemen im Bereich des Siliciummaterials ab. Im Kristallisationsbereich beschäftigen wir uns mit Prozesstechnologien wie dem Floatzone- und Czochralski-Verfahren, um monokristallines Silicium herzustellen. Darüber hinaus entwickeln wir blockkristallisiertes Silicium. Für die Blockkristallisation verfügen wir über eine Kristallisationsanlage, die es uns erlaubt, 15 kg bis 250 kg schwere multikristalline Blöcke herzustellen. Auch die Säge- und Schleiftechnologie ist vorhanden, um aus den kristallisierten Blöcken Säulen und

Wafer anzufertigen. 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 Solarsilicium, z. B. gereinigtes metallurgisches Silicium (»Upgraded Metallurgical Grade Silicon/UMG«). Im Sägebereich beschäftigen wir uns mit der Herstellung dünnerer Wafer und mit Diamantdrahtsäge-Prozessen.

Das Konzept der kristallinen Silicium-Dünnschichtsolarzelle kombiniert qualitativ sehr hochwertige kristalline Siliciumschichten mit Methoden aus der Dünnschichtsolarzellenherstellung 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.

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 substantielle 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 m<sup>2</sup> großen Reinraumlabor, die es uns ermöglichte, mehrere internationale Rekordwirkungsgrade zu erzielen. Zusätzlich stehen uns ca. 900 m<sup>2</sup> Einzellaborflächen zur Verfügung, um effektive Oberflächenpassivierungsschichten, neuartige Metallisierungs- und Dotierverfahren, innovative Nanostrukturierungstechnologien und neue Charakterisierungsmethoden zu entwickeln. In diesem Jahr haben wir unser Technologieportfolio mit der Installation eines Ionenimplanters zur Herstellung von strukturierten Bor- und Phosphordotierungen nochmals erweitert.





In unserem Photovoltaik Technologie Evaluationscenter PV-TEC können wir auf über 1200 m<sup>2</sup> Technologiefäche im Pilotmaßstab, d. h. mit einem Durchsatz von mehr als 100 Wafern pro Stunde, sowohl Solarzellen mit industriell üblichen siebgedruckten Kontakten als auch mit hochwertiger Oberflächenpassivierung und neuartiger Verschaltungsarchitektur herstellen. Für die verschiedenen Technologiebereiche stehen uns flexible halbautomatische und 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 stellen so unsere hohen Qualitätsanforderungen sicher, 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. 2012 haben wir unsere Technologie-Plattform für die Herstellung von Solarzellen aus n-leitendem Silicium deutlich erweitert.

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.

*Der neu im Reinraum des Fraunhofer ISE installierte Ionenimplanter erlaubt die Dotierung von Silicium mit Bor und Phosphor mit einer sehr exakten lokalen Auflösung. In Verbindung mit einem am Fraunhofer ISE entwickelten Ausheilschritt konnten wir so Emitter mit sehr geringen Rekombinationsströmen herstellen. Insbesondere bei Solarzellenstrukturen mit strukturierter Dotierung, z. B. Rückseitenkontaktsolarzellen, bietet diese Technologie große Vorteile.*

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 industrieller Stringer und ein Laminator, ergänzt durch eine Reihe von Prozess- und Analyseplattformen. Weitere Einzelheiten über diese Aktivitäten finden sich im Kapitel Photovoltaische Module und Systeme (s. S. 88).

Unsere Aktivitäten im Bereich Siliciummaterial und -solarzellen am Standort Freiburg werden ergänzt durch das Labor- und Servicecenter LSC Gelsenkirchen (s. S. 82).

## ANSPRECHPARTNER

**Feedstock, Kristallisation und Wafering**Dr. Stephan Riepe  
SIMTECTelefon +49 761 4588-5636  
stephan.riepe@ise.fraunhofer.deDr. Peter Dold  
CSP-LKTTelefon + 49 345 5589-428  
peter.dold@csp.fraunhofer.deProf. Hans Joachim Möller  
THMTelefon +49 3731 2033-160  
hans.joachim.moeller@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**Module**

Dr. Harry Wirth

Telefon +49 761 4588-5858  
harry.wirth@ise.fraunhofer.de**Produktionsanlagen und Prozessentwicklung**

Dr. Ralf Preu

Telefon +49 761 4588-5260  
ralf.preu@ise.fraunhofer.de

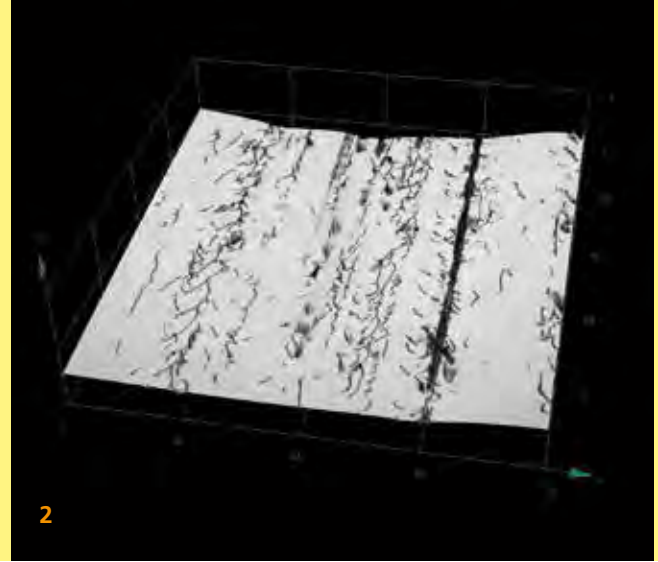
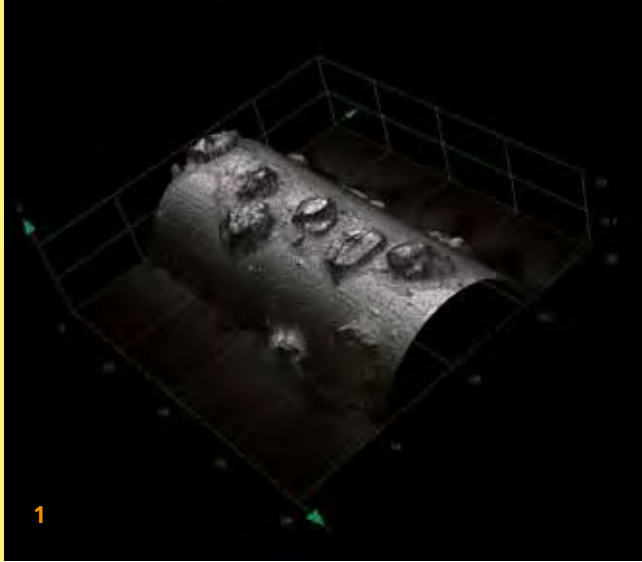
Dr. Stefan Glunz

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



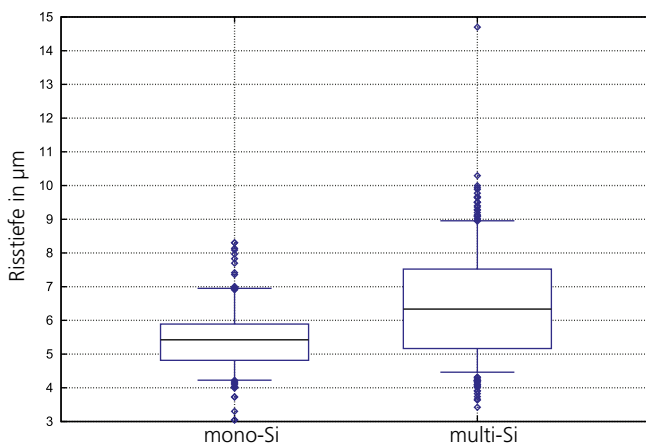


## SILICIUMWAFERHERSTELLUNG MIT DIAMANTBESETZTEM SÄGEDRAHT

Die Waferherstellung mit diamantbesetztem Sägedraht ist neben dem Sägeprozess mit losem Abrasiv eine neue, alternative Technologie. Der technologische Unterschied liegt in erster Linie in der Sägedrahtbestückung mit fest anhaftenden Diamantkörnern. Dadurch liegt ein veränderter Abtragsprozess vor. Die Erforschung und Weiterentwicklung dieser Trenntechnologie ist ein Schwerpunkt des Fraunhofer Technologiezentrums für Halbleitermaterialien THM. Unsere Ergebnisse zeigen, dass sich die Oberflächenschädigung und Bruchfestigkeit von mono- und multikristallinem Siliciummaterial stark unterscheiden.

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

Der Einsatz von diamantbesetzten Drähten zur Siliciumwaferherstellung ist ein relativ neues Verfahren. Für eine industrielle Nutzung dieser Technologie sind zum Teil grundlegende Untersuchungen sowie innovative Prozessoptimierungen



3 Darstellung der maximalen Risstiefen mehrerer mono- und multikristalliner Siliciumschrägschliffproben.

1 Hochaufgelöste laser-konfokale 3D-Aufnahme ( $256 \times 256 \times 80 \mu\text{m}^3$ ) eines kommerziellen diamantbesetzten Sägedrahts.

2 3D-Aufnahme ( $128 \times 128 \mu\text{m}^2$ ) eines Siliciumschrägschliffs. Durch Anätzen der Probe wurden Microrisse sichtbar gemacht (schwarze Kontraste).

notwendig. Die technische und analytische Ausrüstung des Fraunhofer THM wurde auf dieses Forschungsziel ausgerichtet. Für die Sägeversuche haben wir eine industrielle Vieldrahtsäge technisch optimiert und mit zusätzlicher Messtechnik versehen. Damit stellten wir Wafer aus mono- und multikristallinem Silicium her und charakterisierten deren Oberflächen-, Riss- und Brucheigenschaften. Die Oberflächencharakterisierung erfolgte mit laser-konfokalen und chromatisch-konfokalen Messsystemen. Zur Risstiefenbestimmung an einem Wafer stellen wir einen Schrägschliff her. Die Risse werden im Anschluss durch Strukturätzen hervorgehoben und optisch ausgewertet, um die maximale Risstiefe zu bestimmen. Durch die Auswertung dieser Parameter lässt sich einerseits der Sägeprozess verbessern, andererseits aber auch die Bruchanfälligkeit der Wafer in industriellem Maßstab bestimmen und optimieren. Wir konnten zeigen, dass die maximalen Risstiefen bei monokristallinen Wafern um etwa 15 % geringer sind und die Risstiefenschwankung auf einem Wafer um etwa 40 % kleiner ist im Vergleich zu multikristallinen Siliciumwafern (Abb. 3). Das lässt auf eine höhere kritische Bruchspannung für monokristalline Wafer schließen, was durch Bruchtests bestätigt wurde.

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



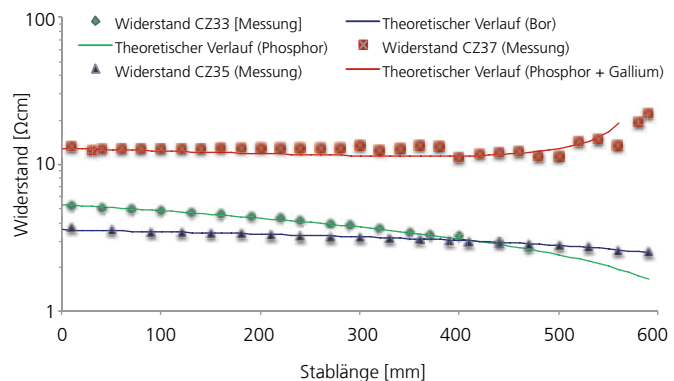
## HERSTELLUNG MONOKRISTALLINER P- UND N-TYP INGOTS MIT CZOCHRALSKI-VERFAHREN

Die Czochralski-Technik stellt derzeit das Standardverfahren für die Herstellung monokristalliner Ingots dar. Mit unserer Czochralski-Anlage sind wir in der Lage, Kristalle von industrieller Größe zu ziehen, mit typischen Durchmessern von 8" (210 mm). Aktuelle Herausforderungen liegen in der Bereitstellung von n-Typ Material mit möglichst geringer Variation des Widerstands als Basis für hocheffiziente Zellkonzepte. Im Labor für Kristallisationstechnologie des Fraunhofer CSP (CSP-LKT) in Halle untersuchen wir das Einbauverhalten verschiedener Dotierstoffe und testen unterschiedliche Möglichkeiten, den axialen Widerstandsverlauf zu beeinflussen. Ein Ansatz, an dem wir aktuell arbeiten, ist das zusätzliche Dotieren mit Gallium. Eine weitere Möglichkeit ist das Nachführen von Silicium in den Prozess.

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

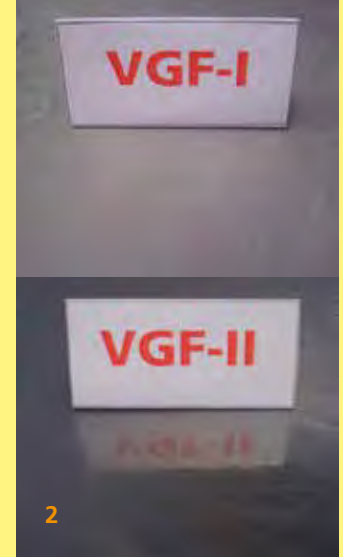
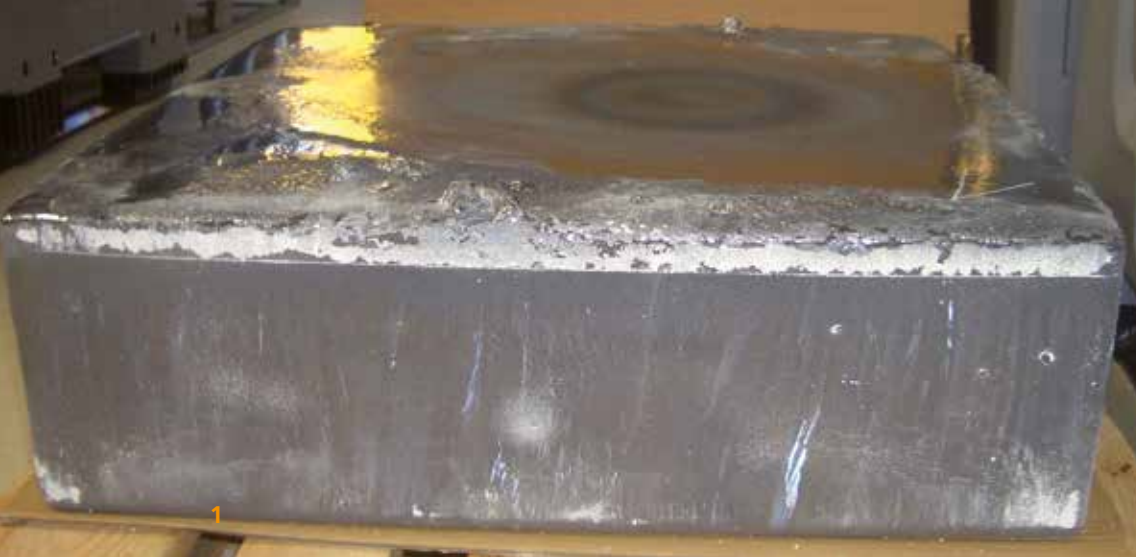
Die Herstellung monokristalliner Ingots als Ausgangsmaterial für die Zellproduktion stellt ein zentrales Thema für das CSP-LKT dar. Mit unserer Czochralski-Anlage vom Typ EKZ-2700 können wir Einwaagen bis 60 kg verarbeiten, was bei einem Durchmesser von 210 mm einer Ingotlänge von ungefähr 600 mm entspricht (oder einem Äquivalent von ungefähr 2000 Wafern pro Durchlauf). Wesentliche Fragestellungen sind für uns die Evaluierung von Feedstockmaterialien, die Wechselwirkungen zwischen Siliciumschmelze und Tiegel und die Tiegelkorrosion, das Kristallisationsverhalten verschiedener Materialtypen, wie z. B. Granulat gegenüber Siliciumbruch, das Nachführen von Silicium während des Prozesses und schließlich die Herstellung von Ingots mit bestimmten Dotierungen und Dotierstoffverläufen.

1 Czochralski-Einkristall, Durchmesser: 210 mm, Gewicht 55 kg.



2 Widerstandsprofile verschiedener 8" Czochralski-Kristalle: berechneter und mit 4-Punktsonde gemessener Verlauf.

Die steigende Nachfrage nach n-Typ Material – als Grundlage für zukünftige Hocheffizienzprozesse – stellt höhere Anforderungen an die Kristallisation: Während sich Bor (für die Herstellung von p-Typ Material) relativ gleichmäßig in den Kristall einbaut, findet bei der Verwendung von Phosphor zur Erzeugung von n-Typ Kristallen eine deutliche Anreicherung im hinteren Bereich des Ingots statt, was zu einem starken Abfall des Widerstands führt. Um einen möglichst stabilen Zellprozess fahren zu können, ist ein gleichmäßiger, homogener Verlauf des Widerstands erstrebenswert. Möglichkeiten der Steuerung stellen, z. B. das Nachführen (»Feeden«) von Silicium, oder die Ko-Dotierung von Gallium zur Phosphorgrunddotierung dar.



## KRISTALLISATION VON 250 KG SILICIUM-BLÖCKEN – OPTIMIERUNG DES GASSTROMS

**Multikristalline Ingots zeichnen sich einerseits durch relativ geringe Sauerstoffkonzentrationen und somit einer reduzierten B-O-Komplexbildung aus, andererseits besteht die Gefahr der Kohlenstoffübersättigung und somit der Bildung von SiC-Ausscheidungen. Die Optimierung des Gasstroms in unserem G4-Kristallizer stellt für uns einen wichtigen Arbeitsschwerpunkt dar. Das Ziel ist, die Wechselwirkung zwischen dem CO der Prozessgasatmosphäre und der Oberfläche der Siliciumschmelze zu minimieren, um eine möglichst hohe Ausbeute an Blöcken und an verwertbarem Wafermaterial zu erhalten.**

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

Am CSP-LKT in Halle steht uns mit dem Multikristallizer VGF-732 eine Anlage zur Verfügung, in der G4-Blöcke mit einem Gewicht von 250 kg kristallisiert werden können. Typische Prozesszeiten liegen im Bereich von 40–50 Stunden, mit Erstarrungsgeschwindigkeiten im Bereich von 1 cm/h. Kristallisiert wird im kontinuierlichen Argonstrom. Das Argon dient zum einen der Erzeugung einer Schmelzkonvektion, wodurch eine bessere Durchmischung der Schmelze erreicht wird. Zum anderen wird durch Argon der Abtransport von CO aus dem Innenbereich des Ofens erleichtert. Die sogenannte Hot-Box, d. h. der Bereich im Ofen, in dem sich der Tiegel mit dem zu prozessierenden Silicium befindet, besteht aus einem Graphitstütztiegel, Graphitheizern und Graphitisolationsmaterial. Aufgrund der hohen Temperaturen bis 1500 °C führen Spuren von Sauerstoff oder Restfeuchte zur Bildung von CO. Kommt CO in Kontakt mit flüssigem Silicium, wird es absorbiert, in der Schmelze gelöst und fällt oberhalb einer Grenzkonzentration als SiC-Präzipitat aus, das dann in den wachsenden Kristall mit eingebaut wird. Diese SiC-Ausscheidungen bereiten Probleme

1 Multikristalliner G4-Block, Gewicht 250 kg.

2 Kristallisation im offenen Tiegelsystem führt zu einer grünlich-grauen Verfärbung der Blockoberfläche (oben – VGF-I), Optimierung des Argonstroms resultiert in blanken Oberflächen (unten – VGF-II).

beim Wafern der Blöcke und können zu Kurzschlüssen (Shunts) in den Zellen führen. Durch das Design der Hot-Box und durch die Optimierung des Argonstroms und der Geometrie des Einlassrohrs eröffnet sich die Möglichkeit, die Wechselwirkung zwischen CO und Siliciumschmelze zu kontrollieren bzw. zu minimieren. Zum besseren Verständnis der chemischen Vorgänge im Gasraum haben wir einen Restgasanalysator implementiert – dies erlaubt uns, die Konzentration von Restfeuchte, von Sauerstoff oder Kohlenmonoxid oder von anderen gasförmigen Verunreinigungen als Funktion des Prozesszustands und der Prozessparameter zu untersuchen.

Der Übergang von einer offenen zu einer halboffenen und letztendlich zu einer quasi geschlossenen Tiegelanordnung hat zu einer kontinuierlichen Reduktion der SiC-Bildung geführt – war anfangs noch eine grünlich-graue Verfärbung auf der Blockoberfläche vorhanden, sind wir jetzt in der Lage, Blöcke mit annähernd spiegelnden Oberflächen zu kristallisieren. Weiteres Optimierungspotenzial besteht in der Flussrate des einströmenden Argons sowie der Geometrie des Gaseinströmrohrs. Durch die Verbesserung der Rohrgeometrie in Kombination mit der Verwendung eines quasi geschlossenen Tiegelsystems konnten wir den Argonstrom (und somit den Argonverbrauch) deutlich reduzieren, ohne dass dies zu einer merklichen Bildung von SiC im Oberflächenbereich geführt hat.





## BLOCKSILICIUM HOHER REINHEIT FÜR HOCHEFFIZIENTE SOLARZELLEN

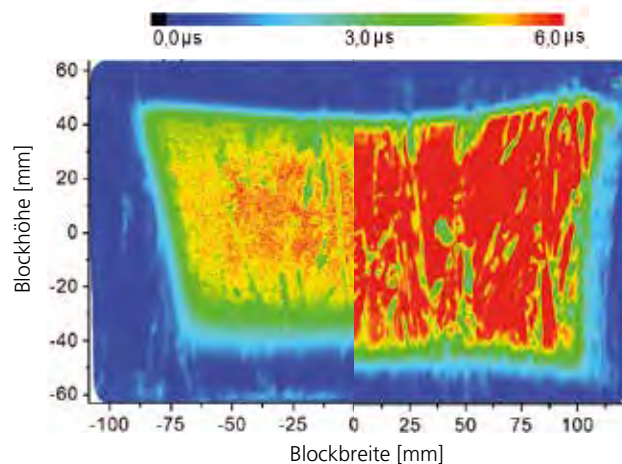
Bei der gerichteten Erstarrung von Blocksilicium mit hoher Materialqualität für die Verwendung in hocheffizienten Solarzellen besteht eine wesentliche Herausforderung darin, während der Kristallisation den Eintrag von Verunreinigungen aus dem Tiegelsystem und dem Ofenraum in das Silicium zu reduzieren. Am Silicium Material Technologie und Evaluationscenter SIMTEC erforschen wir die Mechanismen des Übergangs von Verunreinigungselementen aus verschiedenen Tiegelmaterialien und -beschichtungen sowie den Eintrag von volatilen Verunreinigungen über die Gasphase in das Silicium. Durch Verwendung neuer Materialien im Tiegelsystem sowie durch optimiertes Gasmanagement haben wir eine signifikante Verbesserung der elektrischen Eigenschaften des multikristallinen Siliciums erreicht.

Fridolin Haas, **Stephan Riepe**, Claudia Schmid, Mark Schumann, Evariste Wete, Andreas Bett

Das heute industriell eingesetzte Tiegelsystem besteht aus einem Quarzguttiegel, umgeben von einem zumeist aus Graphit hergestellten Stützsystem. Der Quarzguttiegel ist mit einer Trennschicht aus Siliciumnitrid zum Lösen des Siliciumblocks vom Tiegel beschichtet. Beim Schmelzen und Erstarren des Siliciums können Verunreinigungsatome oder kleine Partikel aus dem Tiegelsystem herausgelöst werden und in das Silicium übergehen. Dadurch erfolgt ein Eintrag von Elementen in das Silicium, die insbesondere im Rand- und Kappenbereich des Blocks die Materialqualität vermindern und Regionen niedriger Ladungsträgerlebensdauer verursachen.

Durch die Verwendung von experimentellen Tiegeln aus hochreinem Quarzmaterial in einem dafür entwickelten Kristallisationsprozess sowie dem Einsatz von aufgereinigtem Siliciumnitridpulver zur Herstellung der Tiegelbeschichtung können wir Siliciumblöcke mit hoher Materialreinheit durch

- 1 Seitenansicht eines experimentellen Siliciumblocks nach Kristallisation mit einer weiterentwickelten Tiegelbeschichtung.
- 2 Spiegelnde Oberfläche eines experimentellen Siliciumblocks nach Optimierung des Gasmanagements.



- 3 Topographien der Ladungsträgerlebensdauer an einem vertikalen Querschnitt eines G1-Blocks mit herkömmlichem industriellem Tiegelsystem (linke Hälfte) und hochreinem experimentellem Tiegelsystem (rechte Hälfte).

signifikant verminderte Konzentrationen schädlicher Verunreinigungen, z. B. Eisen und anderen Übergangsmetallen, herstellen (Abb. 3). Die Konzentration von Sauerstoff und Kohlenstoff konnten wir durch Optimierung des Gasmanagements im Ofenraum mit Hilfe von Fluidsimulationen und Weiterentwicklung des Tiegelsystems signifikant reduzieren. Dies ist an der spiegelnden Blockoberfläche der Siliciumblöcke zu erkennen (Abb. 2).

Die Arbeiten werden von der Fraunhofer-Stiftung und dem Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) im Rahmen des Projekts »SolarWins« unterstützt.



## ENTWICKLUNG SLURRYBASIERTER DRAHTSÄGEPROZESSE FÜR DÜNNE WAFER

Die industrielle Herstellung von Siliciumwafern für die Photovoltaik erfolgt durch das Sägen von Kristallen in einer Vielspaltdrahtsäge. Bei diesem Prozess wird das Siliciummaterial durch ein Feld von mehreren hundert Drahtschlaufen geführt und mittels eines Abrasivmediums in Wafer zersägt. Am Silicium Material Technologie und Evaluationscenter SIMTEC arbeiten wir an der Weiterentwicklung des slurrybasierten Drahtsägeprozesses zur Herstellung dünner Wafer. Dabei untersuchen wir den Einfluss von Prozessparametern, welche die Wafergeometrie beeinflussen und die mechanische Festigkeit von Wafern reduzieren können. Basierend hierauf haben wir einen Prozess zur Herstellung von Wafern mit einer mittleren Dicke von 110  $\mu\text{m}$  etablieren können.

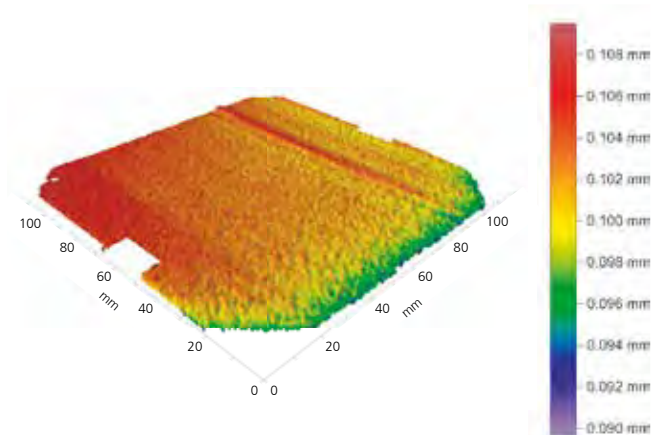
Philipp Häuber, Teresa Orellana, Stephan Riepe, Devid Sabo, **Bernd Weber**, Andreas Bett

1 Monokristalliner 110  $\mu\text{m}$  dicker Wafer, der im 4-Schneiden-Test auf mechanische Stabilität geprüft wird.

Im industriellen Drahtsägeprozess mittels Vielspaltdrahtsägen werden immer dünnere Wafer für Solarzellen hergestellt. Zum einen werden durch eine höhere Waferausbeute pro Siliciumingot die Kosten pro Wafer reduziert, zum anderen können dünnere Solarzellen Vorteile hinsichtlich des Wirkungsgrads aufweisen. Für Dicken kleiner 110  $\mu\text{m}$  steigen jedoch die Anforderungen an den Sägeprozess, um homogene Wafergeometrien zu erhalten. Durch Weiterentwicklung des slurrybasierten Sägeprozesses haben wir Wafer mit einer mittleren Dicke kleiner 110  $\mu\text{m}$  und geringer Dickenvarianz über die Waferfläche herstellen können (Abb. 2).

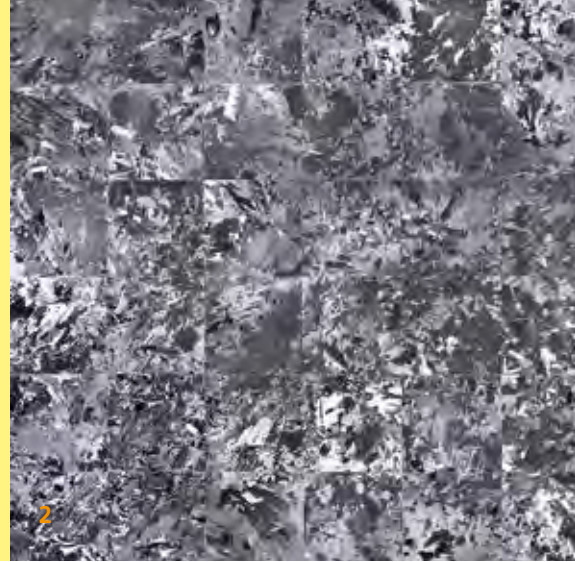
Ein wichtiger weiterer Aspekt ist die stark steigende Gefahr von Waferbruch während des Drahtsägeprozesses und der darauffolgenden Prozessschritte. Im Rahmen unserer Entwicklungsarbeiten haben wir daher die Auswirkungen von Faktoren untersucht, welche die mechanische Stabilität von Wafern reduzieren. Besonders signifikant wirken sich Schädigungen am Waferrand aus, was eine weitere Bearbeitung der Blockoberflächen nach dem Zerteilen des Ingots unumgänglich macht. Analysen an 110  $\mu\text{m}$  dicken Wafern mit dem 4-Schneiden-Messaufbau (Abb. 1) zeigen, dass durch das Bandsägen eine große Oberflächenschädigung eingebracht wird. Diese kann jedoch sowohl durch Schleifen als auch Ätzen sowie eine Kombination aus beiden weitestgehend reduziert werden.

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



2 Dickenverteilung eines monokristallinen Wafers mit den Abmessungen 125 x 125  $\text{mm}^2$  und einer nominellen Dicke von 110  $\mu\text{m}$ .





## ProConCVD – KOSTENGÜNSTIGE SILICIUM-EPITAXIE FÜR DIE PHOTOVOLTAIK

**Epitaxie von Silicium ist eine Schlüsseltechnologie, um zukünftig kristalline Siliciumsolarzellen mit geringer Dicke herstellen zu können. Seit einigen Jahren entwickeln wir eine Hochdurchsatzanlage für einen produktionsnahen und kostengünstigen Epitaxieprozess. Nun ist es uns erstmals gelungen, mehrere Quadratmeter Substrate mit Silicium in nur einem Durchlauf epitaktisch zu beschichten. Damit ist der Grundstein gelegt, um das Beste aus Mikroelektronik, Dünnschicht- und kristalliner Siliciumsolarzellentechnologie erfolgreich miteinander zu verbinden.**

Martin Arnold, Philipp Barth, Dirk Krogull, David Pocza,  
**Stefan Reber**, Norbert Schillinger, Andreas Bett

Aktuell ist eine Reihe von neuen Solarzellenkonzepten in der Entwicklung, die auf dünnen, hochqualitativen kristallinen Siliciumschichten aufbauen. Entweder kommen dabei ultradünne Wafer zur Anwendung («Kerfless Wafers»), oder es werden modulgroße Flächen beschichtet. Für alle Konzepte wird eine Abscheidetechnik benötigt, die hochqualitative Siliciumschichten liefert. Wir haben dazu die ProConCVD (Production Continuous Chemical Vapor Deposition) entwickelt, bei deren Spezifikation niedrige Herstellungs- und Produktionskosten sowie ein hoher Durchsatz im Vordergrund standen.

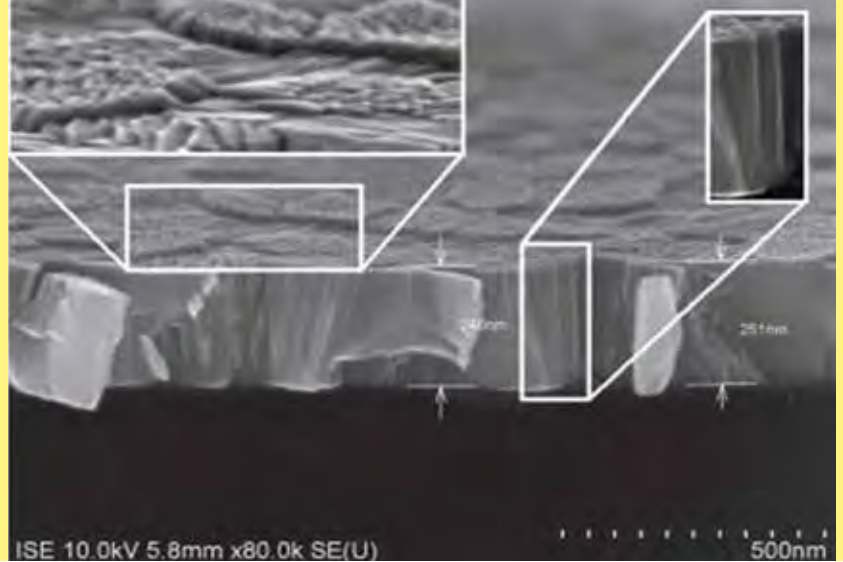
Die Anlage besteht aus sechs Einzelspuren, in denen Substratträger von etwa 0,5 x 0,5 m<sup>2</sup> Fläche aneinandergereiht werden. Die Trägerreihen werden durch eine Ladezone, dann durch zwei geheizte Abscheidazonen und schließlich durch die Entladezone geschoben. Gasschleusen an der Be- und Entlade-

**1** ProConCVD: rechts im Bild Substratträger in der Beladestation, nach links anschließend die Eingangsgasschleusen sowie der Heizofen. Die Träger verlassen die Anlage auf der linken Seite.

**2** In der ProConCVD epitaktisch beschichtete 156 x 156 mm<sup>2</sup> große multikristalline Wafer. In dem 30 Minuten dauernden Prozess wurden 72 Wafer mit ca. 13 µm Silicium beschichtet.

zone sorgen dafür, dass kein Gasaustausch zwischen dem Anlageninneren und dem Außenbereich entsteht und dass der Transport ohne Unterbrechungen kontinuierlich durchgeführt werden kann. Durch die spezielle paarweise Anordnung der Spuren werden die Substrate im Durchlauf aus der Gasphase mit Silicium beschichtet und das bei maximaler Gasausnutzung und ohne jegliche Prozessunterbrechungen durch Lade- und Entladevorgänge. Mit etwa 5 m<sup>2</sup> Fläche der Abscheidazonen und einem maximalen Vorschub von zwölf Metern pro Stunde können wir mit unseren Hochtemperaturprozessen Durchsätze von mehr als 30 m<sup>2</sup> oder 1200 Wafern pro Stunde erreichen – etwa 100mal mehr als kommerziell erhältliche Mikroelektronik-Reaktoren.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt und Reaktorsicherheit (BMU) sowie durch die Fraunhofer-Zukunftsstiftung gefördert.



## SOLARZELLEN MIT RÜCKSEITIGEM AMORPHEM SILICIUM-HETEROEMITTER

**N-typ Solarzellen mit einem amorph-kristallinen Silicium-Heteroübergang haben aufgrund der effektiven Passivierung der Oberfläche und den damit erreichbaren sehr hohen Spannungen enormes Wirkungsgradpotenzial. Ein limitierender Effekt ist jedoch die Verringerung des Stroms durch die parasitäre Absorption im amorphen Silicium-Heteroemitter und des transparenten leitfähigen Oxids (TCO) auf der lichtzugewandten Seite der Solarzelle. Indem der Silicium-Heteroemitter auf der Solarzellenrückseite platziert wird, kann dieser Verlustmechanismus reduziert werden. Damit ergeben sich neue Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich Dotierung und Schichtdicke der amorphen Siliciumschicht und auf das TCO auf der Vorderseite kann verzichtet werden.**

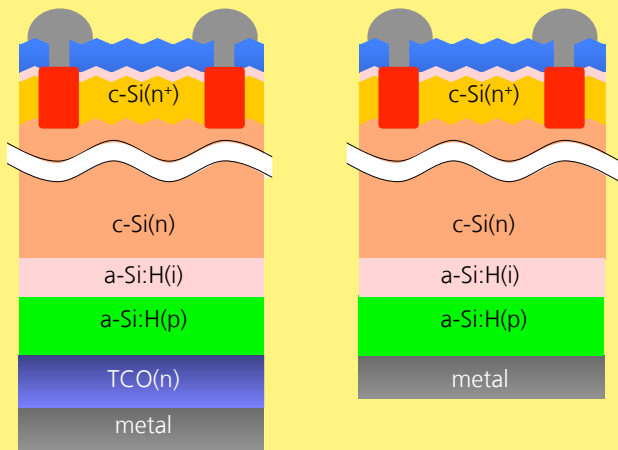
**Martin Bivour**, Lena Breitenstein, Frank Feldmann, **Martin Hermle**, Nicolas König, Antonio Leimenstoll, **Christian Reichel**, Markus Reusch, Kurt-Ulrich Ritzau, Felix Schätzle, Christian Schetter, Sonja Seitz, Sebastian Schröer, Harald Steidl, Nadine Weber, Karin Zimmermann, Stefan Glunz

Solarzellen mit einem amorph-kristallinen Silicium-Heteroübergang zeichnen sich aufgrund geringer Oberflächenrekombination durch ein hohes Wirkungsgradpotenzial aus und sind daher ein wichtiger Teil unserer Forschungsaktivitäten im Bereich von n-typ Silicium. Durch die effektive Passivierung der kristallinen Si-Oberflächen mit amorphen Si-Schichten lassen sich für diese Solarzellen sehr hohe Spannungen erreichen. Die hohen Spannungen stehen jedoch meist einem reduzierten Strom gegenüber, da in den amorphen Si-Schichten und der benötigten TCO-Schicht auf der lichtzugewandten Seite parasitäre Absorption stattfindet – also absorbiertes Licht nicht in Strom umgewandelt wird.

- 1 Clusteranlage zur Abscheidung von amorphen Si-Heteroemittern mittels plasmaunterstützter chemischer Gasphasenabscheidung (PECVD) und von gesputterten TCO-Schichten (links). Bei der REM-Aufnahme von einer TCO-Schicht sind deutlich die kolumnare Struktur und die großen Kornbereiche zu erkennen (rechts).
- 2 N-Typ Si-Solarzelle mit amorphem Si-Heteroemitter, a-Si:H(p), mit (links) und ohne (rechts) TCO(n)-Schicht auf der Rückseite. Zur Passivierung der Vorderseite wird ein Vorderseitenfeld, c-Si(n<sup>+</sup>), mit passivierenden dielektrischen Schichten verwendet.

Der Wirkungsgrad der Solarzellen ist somit, trotz hoher Spannungen, limitiert. Eine Möglichkeit, die parasitäre Absorption in den amorphen Si-Schichten zu umgehen, besteht darin, den amorphen Si-Heteroemitter auf die Rückseite der Solarzelle zu platzieren und zur Passivierung der Vorderseite bekannte transparente Methoden wie die Verwendung eines diffundierten oder implantierten Vorderseitenfelds und/oder von passivierenden dielektrischen Schichten anzuwenden.

Für einen rückseitigen Si-Heteroemitter ergeben sich neue Optimierungsmöglichkeiten hinsichtlich der Dotierung und Schichtdicke, da der Si-Heteroemitter nicht auf exzellente optische Eigenschaften ausgelegt werden muss. In klassischen Heterosolarzellen wird der p-Typ amorphe Si-Heteroemitter mit einem n-leitenden TCO kontaktiert. Dabei bildet sich eine Schottky-Barriere aus, die den Transport von Ladungsträgern behindern und den Füllfaktor der Solarzellen stark beeinflussen kann. Wir konnten zeigen, dass die beleuchtungsabhängige Spannungsmessung eine einfache und wertvolle Methode zur Untersuchung dieser Barrieren darstellt. In Abb. 4 ist exemplarisch dargestellt, dass eine hohe Emitterdotierung den Einfluss dieser Schottky-Barriere verringern kann und die Füllfaktoren dadurch erhöht werden können.

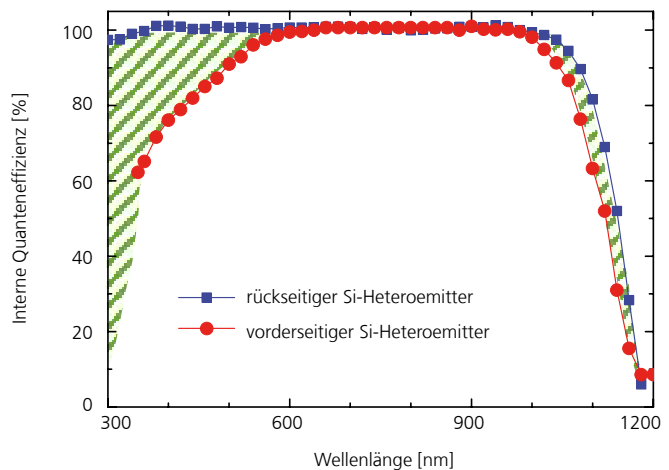


2

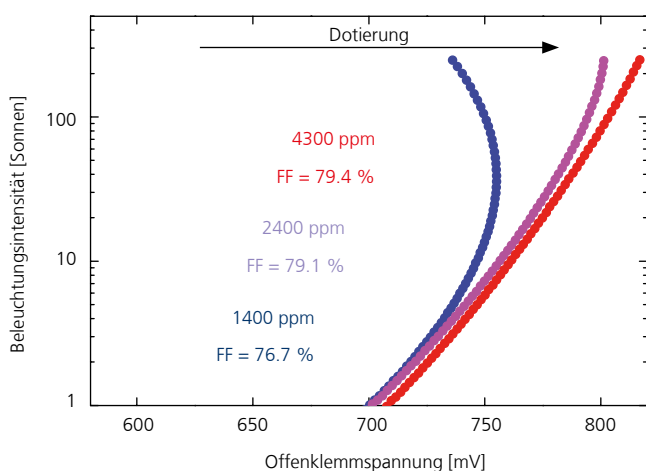
Ein weiterer Vorteil bei Zellen mit rückseitigen p-Typ Emittlern ist, dass prinzipiell auf eine TCO-Kontaktschicht verzichtet werden kann. Dies ermöglicht die Herstellung einer TCO-freien Heterosolarzelle und damit ergeben sich mehr Freiheitsgrade bei der elektrischen Charakterisierung der Kontakteigenschaften. Die Untersuchung der Kontakteigenschaften kann auf nicht transparente Kontaktschichten erweitert werden und damit einen tieferen Einblick in die limitierenden Mechanismen liefern. Zusätzlich zu den bereits genannten Vorteilen der Solarzelle mit rückseitigem amorphem Si-Heteroemitter kann für die Sammlung der Ladungsträger an der Vorderseite die zusätzliche Leitfähigkeit in der Basis der Solarzelle genutzt werden, um hohe Füllfaktoren zu erreichen. Mit solch einem Konzept konnten wir den Wirkungsgrad der Solarzellen in unseren Laboren auf bis zu 22,8 % steigern. Diese Zellen sind nicht nur durch hohe Leerlaufspannungen von bis zu 705 mV und Kurzschlussstromdichten von 39,9 mA/cm<sup>2</sup> gekennzeichnet, sondern weisen insbesondere für Heterokontakte sehr hohe Füllfaktoren von bis zu 81,2 % auf.

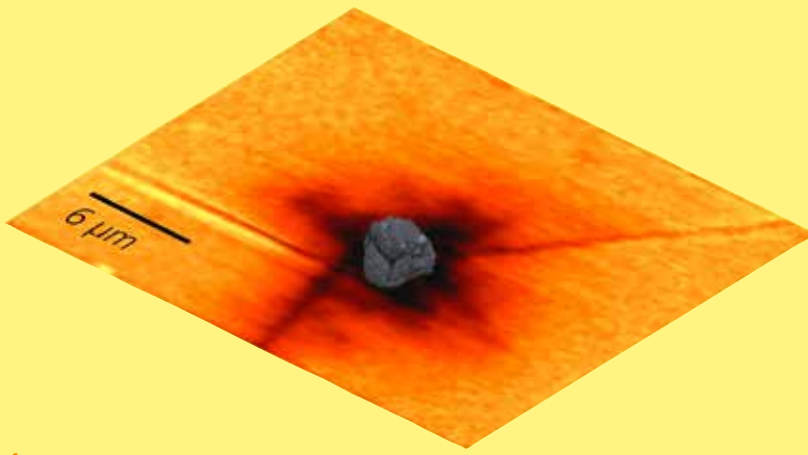
Die Arbeiten werden durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördert.

4 Beleuchtungsabhängige Offenklemspannung von Solarzellen mit amorph-kristallinem Si-Heteroübergang für schwach dotierte (blau) und stark dotierte (rot) amorphe Silicium-Heteroemitter.



3 Vergleich der internen Quanteneffizienz von Solarzellen mit amorph-kristallinem Si-Heteroemitter auf der Vorderseite (rot) und Rückseite, wobei die Vorderseite ein transparentes diffundiertes Vorderseitenfeld aufweist (blau). Der schraffierte Bereich symbolisiert den Stromgewinn, der durch die Verwendung der transparenten Vorderseite erreicht werden kann.





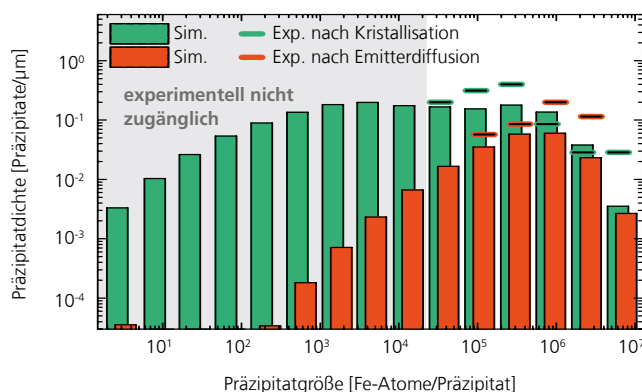
1

# EINFLUSS VON PRÄZIPITATVERTEILUNGEN AUF DIE SILICIUMMATERIALQUALITÄT

In Solarzellen aus blockgegossenem Silicium begrenzen metallische Verunreinigungen die erreichbare Materialqualität und damit das Wirkungsgradpotenzial. Dabei hängt der Einfluss einer Verunreinigung auf die Ladungsträgerlebensdauer und damit auf die Solarzellenqualität maßgeblich von deren Verteilung ab. Die Dichte und die Größenverteilung von Metallpräzipitaten sind sehr empfindlich auf die Temperaturführung beim Kristallisations- und Zellprozess. Mithilfe der entwickelten Modelle lassen sich die Herstellungsprozesse diesbezüglich optimieren und so die Materialqualität verbessern.

Alireza Abdollahinia, **Jonas Schön**, Martin C. Schubert, Wilhelm Warta, Stefan Glunz

Die Limitierung des Wirkungsgradpotenzials von Solarzellen durch metallische Verunreinigungen hängt vom verwendeten Ausgangsmaterial ab. Allerdings führt selbst bei der Verwendung von hochreinem Silicium die Eindiffusion von metallischen Verunreinigungen aus den Tiegelwänden während der Blockkristallisation zu einer Limitierung der Materialqualität durch Metalle, global und insbesondere in tiegelnahen Gebieten.



1 Die Mikrospektroskopische Messung um ein skizziertes Metallpräzipitat in der Nähe des Kreuzungspunktes von drei Korngrenzen zeigt einen deutlichen Abfall der Ladungsträgerlebensdauer in der Umgebung des Präzipitats.

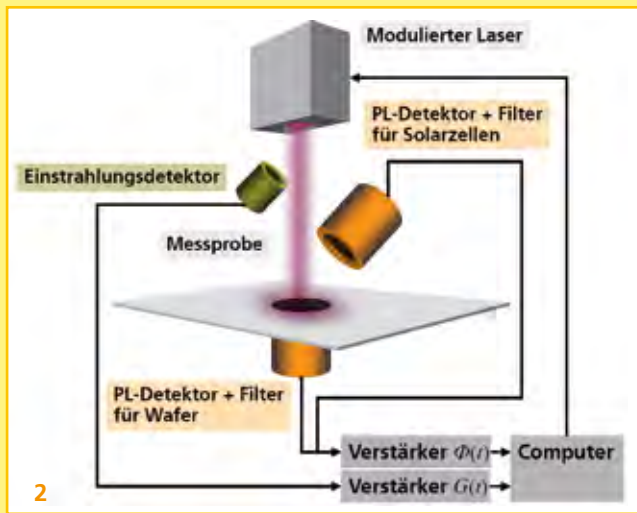
In der Regel sind in Präzipitaten konzentrierte Metalle zwar weniger schädlich für die Solarzelle als in gelöster Form, allerdings liegen die Konzentrationen von präzipitierten Verunreinigungen in Solarzellen aus blockgegossenem Silicium oft Größenordnungen über denen von gelösten Metallen. Die Prozessschritte, die zu einer Reinigung während der Solarzellenherstellung führen, entfernen in erster Linie gelöste Metalle, so dass die Bedeutung der Präzipitate während der Prozessierung zunimmt.

Mithilfe eines am Fraunhofer ISE entwickelten zweidimensionalen Modells wird die Verteilung ausgewählter metallischer Verunreinigungen in Abhängigkeit des Ausgangsmaterials und des Herstellungsprozesses simuliert. Neben der ausgezeichneten Vorhersagequalität für die gelöste Eisenkonzentration demonstriert der Vergleich mit aktuellen Messungen zur Größenverteilung von Eisenpräzipitaten die hohe Güte des Modells (Abb. 2). Aus diesen Ergebnissen wird für die verschiedenen Präzipitate und die homogen verteilten Atome die Limitierung der Ladungsträgerlebensdauer bestimmt, die als Grundlage für Optimierungsprozeduren dient.

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

2 Vergleich von simulierter und gemessener Präzipitatchichte entlang einer Korngrenze in Abhängigkeit von der Präzipitatgröße vor und nach einer Emitterdiffusion. Während der Emitterdiffusion werden hauptsächlich kleine und mittlere Präzipitate entfernt.





# CHARAKTERISIERUNG AUF BASIS ZEITMODULIRTER LUMINESZENZ

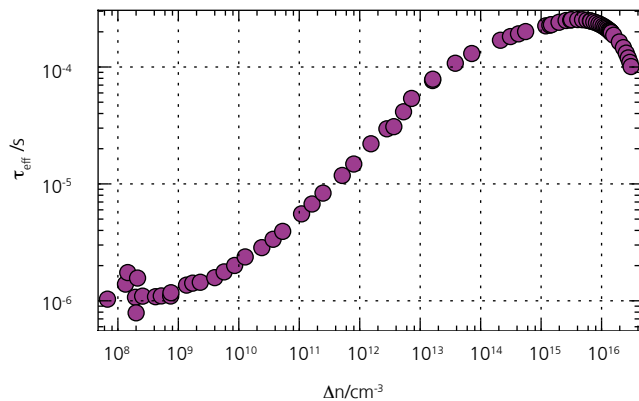
**Zeitmodulierte Lumineszenz ist ein Verfahren zur Bestimmung von Ladungsträgerlebensdauern in Siliciumwafern und Solarzellen. Sie zeichnet sich durch eine sehr geringe Anfälligkeit gegenüber bei Lebensdauerermessungen häufig auftretenden Artefakten sowie durch eine hohe Vielseitigkeit ihrer materialwissenschaftlichen Anwendungen aus. Anknüpfend an die Arbeiten und theoretischen Erkenntnisse der vergangenen Jahre konnten 2012 das Verständnis dieser Methode weiter vertieft und neue Anwendungen erschlossen werden.**

**Johannes Giesecke**, Martin Schubert, Wilhelm Warta, Stefan Glunz

Bei zeitmodulierter (quasi-statischer) Lumineszenz wird die Ladungsträgerlebensdauer eines optisch oder elektrisch angeregten Halbleitersubstrats aus der Phasenverschiebung zwischen dem Zeitverlauf der Anregung freier Ladungsträger und deren strahlender Rekombination bestimmt. Obgleich diese Phasenverschiebung im Allgemeinen nicht identisch mit der Ladungsträgerlebensdauer ist, kann anhand eines am Fraunhofer ISE entwickelten Iterationsverfahrens die tatsächliche injektionsabhängige Lebensdauer aus dieser Phasenverschiebung bestimmt werden. Es konnte ferner gezeigt werden, dass die Phasenverschiebung eines quasi-statisch zeitmodulierten Experiments einer sogenannten differentiellen Lebensdauer entspricht. Die zugrundeliegende Theorie ermöglicht die analytische Bestimmung der tatsächlichen Lebensdauer aus der messbaren differentiellen Lebensdauer. Dies bedeutet für alle differentiellen Lebensdauerermessungen eine drastische Verringerung des experimentellen Aufwands.

Folgende Anwendungen zeitmodulierter Lumineszenz wurden neu entwickelt:

- 1 Multikristalliner Siliciumwafer in unserem Messaufbau – zeitmodulierte Lumineszenz wird zur Messung der Ladungsträgerlebensdauer von Wafern und Solarzellen verwendet.
- 2 Skizze des am Fraunhofer ISE verwendeten zeitmodulierten Lumineszenz-Messaufbaus.

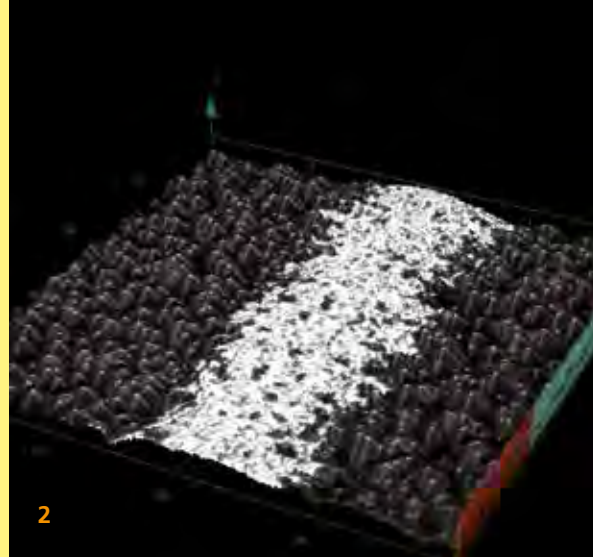
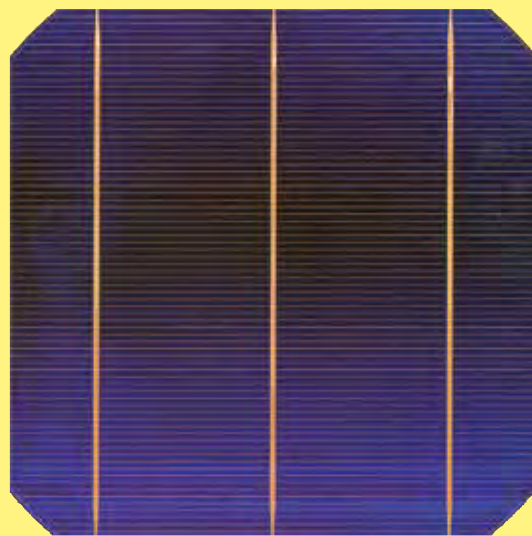


- 3 Effektive Ladungsträgerlebensdauer  $\tau_{eff}$  eines Siliciumwafers, bestimmt als Funktion der Überschussladungsträgerdichte  $\Delta n$  anhand eines am Fraunhofer ISE entwickelten Verfahrens auf der Basis dynamischer Photolumineszenz.

- Verfahren zur Bestimmung der effektiven Lebensdauer über einen sehr breiten Injektionsbereich (Abb. 3). Die Messung bei sehr geringen Injektionsdichten ist für diverse materialwissenschaftliche Anwendungen von hoher Relevanz.
- Verfahren zur Bestimmung der Nettodotierung von Siliciumsubstraten
- Lebensdauerbestimmung an Solarzellen mittels dynamischer Elektrolumineszenz

Die Arbeiten wurden von der Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen des Projekts »SiliconBEACON« unterstützt.





## DRUCK-GALVANIK HYBRIDKONTAKTE MIT KOSTENGÜNSTIGEN MATERIALIEN

Die Materialkosten und speziell die Metallisierung bieten das größte Potenzial zur Kostensenkung von kristallinen Silicium-Standard solarzellen. Der Ersatz von teurem Silber durch kostengünstiges Kupfer für die Vorderseitenmetallisierung bietet große Chancen, ist aber technologisch anspruchsvoll. Hybridkontakte vereinfachen die Einführung von Kupfer, erfordern aber ein detailliertes Verständnis der Interaktion zwischen den kontaktierenden Druckpasten und den galvanischen Verstärkungslösungen. Mit diesem Wissen ist es möglich, haftfeste und langzeitstabile Hybridkontakte aus Silber, Nickel und Kupfer zu erzeugen, die eine Ersparnis der Materialkosten von bis zu 90 % erlauben.

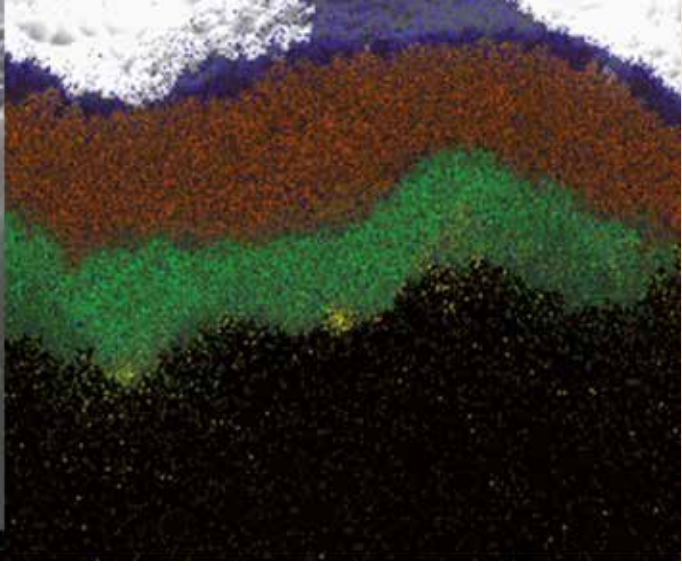
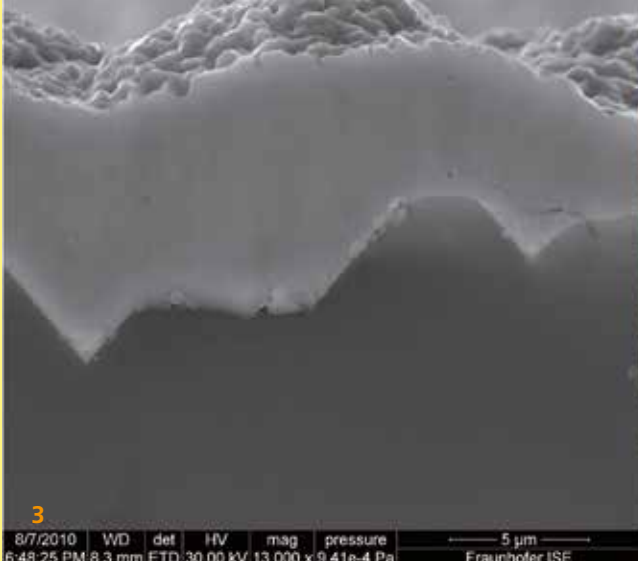
Jonas Bartsch, Markus Glatthaar, Achim Kraft, Andrew Mondon, Markus Wendling, Stefan Glunz

1 Solarzelle nach Verkupfern, vor Aufwachsen der Deckschicht aus Silber oder Zinn.

2 Beispiel für eine siebgedruckte Saatschicht mit sehr geringer Breite (ca. 30  $\mu\text{m}$ ) und sehr geringem Materialaufwand (ca. 40 mg Paste).

Mehrschichtige Kontaktierungssysteme für Solarzellen werden aufgrund ihrer Flexibilität schon seit Längerem intensiv erforscht. Eine der interessantesten Techniken zur Aufbringung der Metalle ist dabei die galvanische Abscheidung aufgrund der hohen Leitfähigkeit der Metallschichten, der niedrigen Prozesstemperaturen und der geringen Kosten.

Die einfachste Einführung eines solchen Prozesses in die Produktion von Solarzellen ist die galvanische Verdickung von gedruckten Kontaktsaatschichten. Für den damit entstehenden Hybridkontakt sind nur sehr geringe Änderungen der bestehenden Fertigungslinien erforderlich, da der Druck der Saatschichten mit bereits heute eingesetzten Technologien durchgeführt werden kann. Dennoch lassen sich mit dieser Technik bei den Materialkosten große Einsparungen erreichen. Diese Punkte stehen im Einklang mit den aktuellen Erfordernissen der Solarzellenindustrie nach Kostensenkungsstrategien ohne großen Investitionsbedarf und ohne massive Eingriffe in den Produktionsablauf.



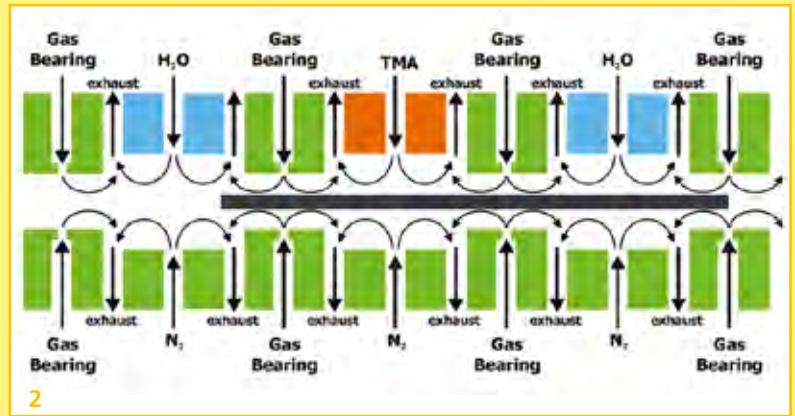
Das Kostensenkungspotenzial besteht durch die Möglichkeit, Silber als Kontaktmaterial zum größten Teil durch Kupfer zu ersetzen. Je nach Druckverfahren zur Erzeugung der Saatschicht werden statt ca. 100 mg Silber (industrieller Siebdruck im Vollaufbau) nur noch ca. 30 mg Silberpaste (Feinlinien-Siebdruck Saatschicht) oder sogar nur noch 8–15 mg Silberpaste (Aerosoldruck bzw. Inkjetdruck) benötigt. Dadurch können die Produktionskosten signifikant gesenkt werden. Zudem ist perspektivisch die Verfügbarkeit von Kupfer in Zukunft deutlich günstiger als die von Silber.

Während die galvanische Abscheidung von Silber auf gedruckte Saatschichten bereits weitgehend beherrscht ist, bestehen noch offene technologische Fragestellungen hinsichtlich der Nutzung von Kupfer in Hybridkontakten. Zunächst muss zur Unterbindung der Kupferdiffusion in die Solarzelle eine Barrierschicht aus Nickel aufgewachsen werden. Hier besteht zum einen die Fragestellung nach der benötigten Beschaffenheit dieser Schicht (Stärke/Homogenität/Imperfektionen). Zum anderen mindern sowohl galvanische Nickel- als auch Kupfer-elektrolyte unter bestimmten Bedingungen die Haftfestigkeit der gedruckten Kontaktschichten auf der Waferoberfläche. Durch chemische Analysen und mikrostrukturelle Untersuchungen konnte ein detailliertes Verständnis der Interaktionen zwischen Paste und Elektrolyt erarbeitet werden. Reaktionen

**3 Querschliff und REM-Aufnahme eines Solarzellen-Hybridkontakts (links) und zugehöriges Elementmapping aus energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX, rechts). Zu erkennen sind im EDX: gedruckte Silber-Saatschicht (gelb), Nickel-Diffusionsbarriere (grün), Kupfer-Leitschicht (rot) und Zinn-Cappingschicht (blau).**

zwischen der Glasmatrix des Kontaktes und einigen Reaktionsprodukten des Kontaktfeuerns und bestimmten ionischen Spezies der Elektrolytlösungen sowie Feuchtigkeit und erhöhte Temperatur beeinträchtigen die Haftung der Kontakte. Durch eine Anpassung des galvanischen Prozesses ist es uns gelungen, die Haftung auf das geforderte Niveau zu heben und somit eine Umsetzung dieser Metallisierungsstrategie bis ins Modul zu ermöglichen. Nachdem erste Abschätzungen eine sehr gute Langzeitstabilität dieser Kontakte prognostizieren, sollen Modultests gemäß der Norm IEC 61215 diese Ergebnisse untermauern. Dadurch wird der Weg für die industrielle Umsetzung dieser kostengünstigen Metallisierung vorbereitet.

Die Arbeiten werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) in den Projekten »KuLi« und »Sonne« unterstützt.



## SCHNELLE INLINE ALD ABSCHIEDUNG VON ALUMINIUMOXID

Die Atomlagenabscheidung (Atomic Layer Deposition, ALD) von  $\text{Al}_2\text{O}_3$  zur Passivierung von p-dotierten, insbesondere hochdotierten Oberflächen, ermöglicht hervorragende Passivierungsergebnisse bereits bei geringsten Schichtdicken. Mit einer Inline ALD Anlage, bei der die sequenzielle Abscheidung der Prozessgase durch räumliche Trennung der Prozesskammern realisiert wird, ist es uns gelungen, die Qualität der Schichten, die mit einer Laboranlage erzielt wurden, auch auf einer industriell einsetzbaren Anlage zu erreichen.

Jan Benick, **Martin Hermle**, Antonio Leimenstoll, **Armin Richter**, Felix Schätzle, Christian Schetter, David Schuldis, Harald Steidl, Karin Zimmermann, Stefan Glunz

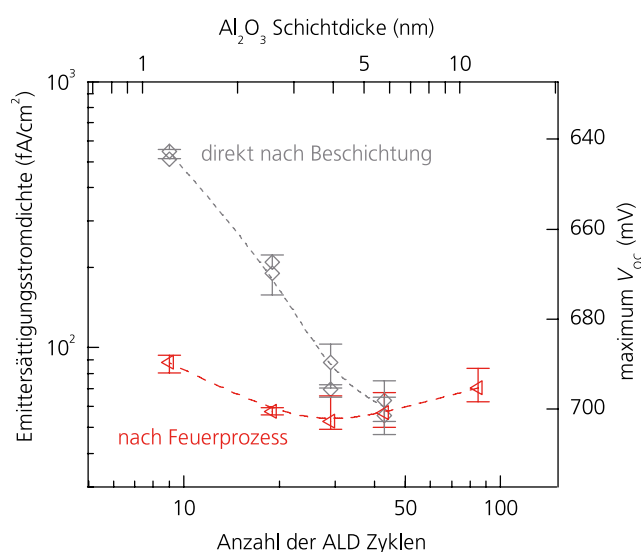
1 *Inline ALD Anlage.*

2 *Schematischer Querschnitt durch die Reaktorzone der Inline ALD.*

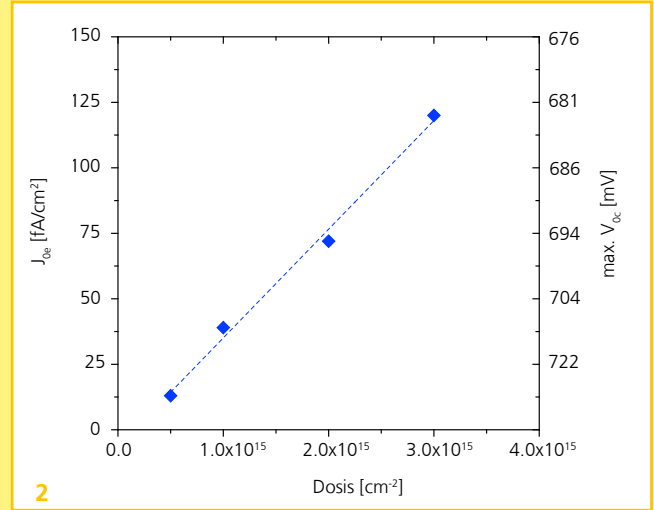
Über die letzten Jahre stieg das Interesse der Silicium-Photovoltaik an Aluminiumoxid ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) stark an. Hintergrund ist die Tatsache, dass Aluminiumoxid insbesondere Bor-dotierte Oberflächen sehr effektiv passiviert.  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ist somit für unterschiedlichste Solarzellenkonzepte interessant, insbesondere für die Rückseite von p-Typ Solarzellen bzw. für die Passivierung des Bor-Emitters von n-Typ Solarzellen.

Mittels Atomlagenabscheidung konnten hierbei bisher die besten Ergebnisse erzielt werden. Durch die sequenzielle Abscheidung von Aluminium und Sauerstoff wächst  $\text{Al}_2\text{O}_3$  dabei Monolage für Monolage auf. Mit den kürzlich von der Industrie entwickelten Inline ALD Reaktoren kann die Prozesszeit deutlich verringert werden, wodurch ein Einsatz in der industriellen Solarzellenproduktion möglich wird. Im Unterschied zur sequenziell ablaufenden ALD sind die Reaktionen bei der Inline ALD auf unterschiedliche Reaktorzonen verteilt, welche die Wafer auf einem Luftkissen durchfliegen (Abb. 2). Typische Schichtdicken von 4 nm können in einer Prozesszeit von ~15 Sekunden erreicht werden.

Durch Optimierung der Prozesse konnten wir mit einem Inline ALD Reaktor der Firma SoLayTec  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Schichten entwickeln, die sowohl auf niedrig- also auch auf hochdotierten p-Typ Oberflächen eine sehr effektive Passivierung ermöglichen. Insbesondere nach dem für die Kontaktbildung von gedruckten Metallpasten benötigten Feuerprozess konnten hervorragende Ergebnisse erzielt werden. In Abb. 3 ist dies exemplarisch für einen Bor-Emitter gezeigt, der mit einer Stapelschicht aus  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$  passiviert wurde. Für n-Typ Solarzellen erlaubt diese Passivierung somit ein  $V_{oc}$ -Potential von über 700 mV.



3 *Emittersättigungsstromdichte als Funktion der  $\text{Al}_2\text{O}_3$  Schichtdicke, gemessen an Bor-dotierten Emitttern, die mit  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiN}_x$  Stapelschichten passiviert wurden.*



## IONENIMPLANTATION FÜR DIE PHOTOVOLTAIK

Viele Zellkonzepte für hocheffiziente Siliciumsolarzellen weisen lokale Dotierungen auf, z. B. hochdotierte Bereiche unter den Kontakten. Für die Realisierung solcher lokalen, hochdotierten Bereiche erweist sich die Ionenimplantation als ideale Technologie, da sich die Strukturierung in-situ mittels Schattenmasken erzeugen lassen. Aufgrund der hohen Energien der implantierten Ionen wird jedoch die Kristalloberfläche während der Implantation geschädigt oder sogar komplett amorphisiert. Diese Oberflächenschädigung muss in einem anschließenden Hochtemperaturschritt ausgeheilt werden, wobei gleichzeitig eine SiO<sub>2</sub>-Passivierschicht erzeugt werden kann. Durch Optimierung des Implantationsprozesses sowie der Ausheilschritte ist es uns gelungen, eine vollständig implantierte Siliciumsolarzelle mit einem Wirkungsgrad von über 22 % zu realisieren.

**Jan Benick, Martin Hermle,** Antonio Leimenstoll, Andreas Lösel, Ralf Müller, Felix Schätzle, Christian Schetter, Sonja Seitz, Nadine Weber, Stefan Glunz

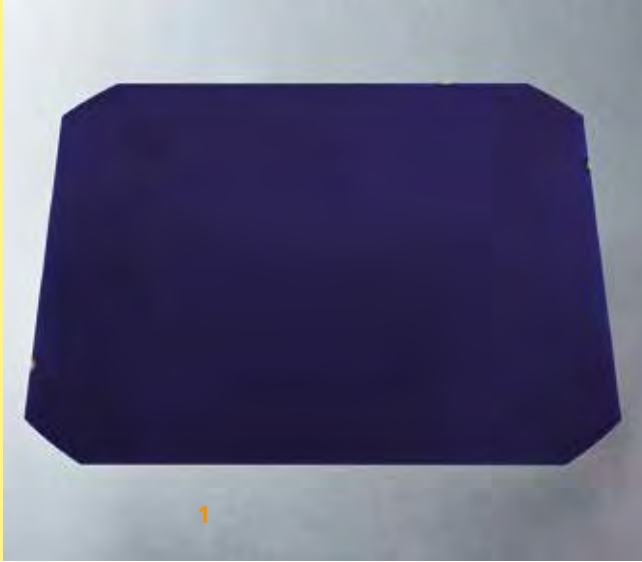
Dotierte Bereiche werden in der Photovoltaik klassischerweise mittels Diffusion (Rohrofen) erzeugt. Bei diesem Prozess wird jedoch der ganze Wafer mit Dotierstoff belegt, sodass lokale Dotierungen nur durch die Verwendung strukturierter Diffusionsbarrieren erzeugt werden können. Mit der Ionenimplantation lässt sich hingegen durch Verwendung einer Schattenmaske, d. h. ohne zusätzliche Prozessschritte, eine lokale Dotierung erzeugen. Auch in Bezug auf Reproduzierbarkeit und Homogenität der Dotierung ist die Implantation anderen Dotierprozessen, z. B. der Rohrofendiffusion, überlegen. Zur Ausheilung der durch die Implantation erzeugten Kristallschäden ist ein Hochtemperaturschritt notwendig. Dieser Schritt kann aber im Solarzellenprozess gleichzeitig dazu verwendet werden, ein qualitativ hochwertiges thermisches Oxid zur Passivierung der Oberfläche aufzubringen.

- 1 Ionenimplanter im Reinraum des Fraunhofer ISE zur Dotierung von Silicium mit Bor und Phosphor mit einer sehr exakten lokalen Auflösung.
- 2 Emittersättigungsstromdichte und maximale Offenklemmspannungen als Funktion der Implantationsdosis für SiO<sub>2</sub> passivierte Phosphorprofile.

Die elektrische Qualität solcher implantierter Emitters ist in Abb. 2 dargestellt. Gezeigt sind hierbei die Sättigungsstromdichten und die sich daraus ergebenden maximale Offenklemmspannungen verschiedener implantierter Phosphoremitter (Variation der Implantationsdosis), die während des Ausheilschritts mit SiO<sub>2</sub> passiviert wurden. Man erkennt deutlich, dass mit geringerer Dosis und damit höherem Schichtwiderstand niedrigere Sättigungsstromdichten (bis zu 20 fA / cm<sup>2</sup>) erreicht werden können.

Mit einem optimiertem Ausheilschritt lassen sich die Kristallschäden sowohl für die Bor- als auch die Phosphor-Implantation gemeinsam ausheilen, sodass nur ein Hochtemperaturschritt hierfür notwendig ist. Zur Evaluierung der entwickelten Prozesse haben wir Solarzellen mit ganzflächiger Bor-Implantation auf der Vorderseite und ebenfalls ganzflächiger Phosphor-Implantation auf der Rückseite realisiert und Wirkungsgrade über 22 % erzielt, der höchste je erreichte Wirkungsgrad einer vollimplantierten Solarzelle mit beidseitiger Kontaktierung. Der nun am Fraunhofer ISE installierte Ionenimplanter ermöglicht uns unterschiedlichste Konzepte und Technologien zu evaluieren und das Wirkungsgradniveau von ionenimplantierten Solarzellen in Zukunft weiter zu steigern.



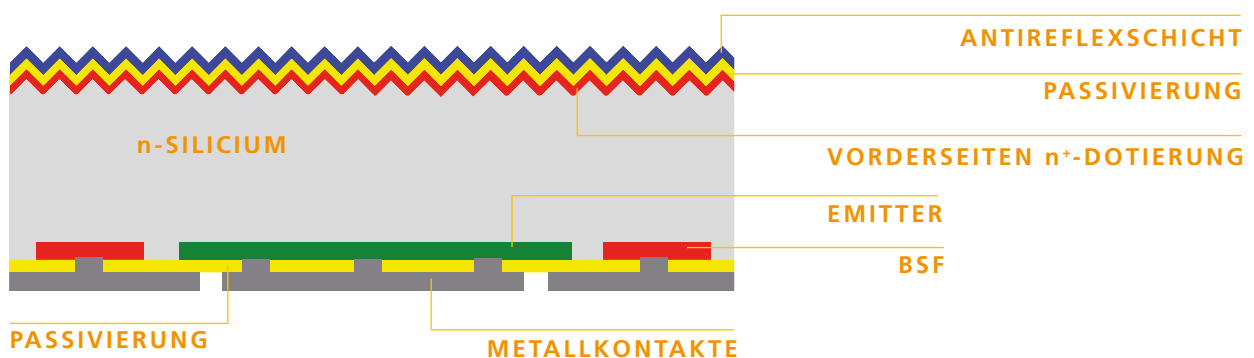


## MASSGESCHNEIDERTE DOTIERSTRUKTUREN FÜR RÜCKSEITENKONTAKTZELLEN

Mit dem Einsatz von Inkjet-Prozessen lassen sich sehr fein strukturierte und präzise definierbare Strukturen erzeugen. Am Fraunhofer ISE haben wir in Zusammenarbeit mit Materialherstellern direkt verdruckbare Inkjet-Tinten eingesetzt, welche als Diffusionsbarriere fungieren. Die Barrierewirkung ist dabei maßgeblich von der Dicke der gedruckten Schicht abhängig. Dieser elegante Prozessschritt ist insbesondere bei der sogenannten Rückseitenkontaktsolarzelle (Back-Contact Back-Junction, BC-BJ) interessant, weil er die Anzahl der Prozessschritte für die Herstellung dieser Solarzellen deutlich reduzieren kann.

1 156 x 156 mm<sup>2</sup> große BC-BJ Solarzelle mit Vorder- und Rückseite, hergestellt mit industriellen Prozessen im Photovoltaik Technologie Evaluationscenter PV-TEC.

Daniel Biro, Raphael Efinger, Philip Hartmann, Mike Jahn, Roman Keding, Achim Kimmerle, Jan Specht, David Stüwe, **Robert Woehl**, Ralf Preu



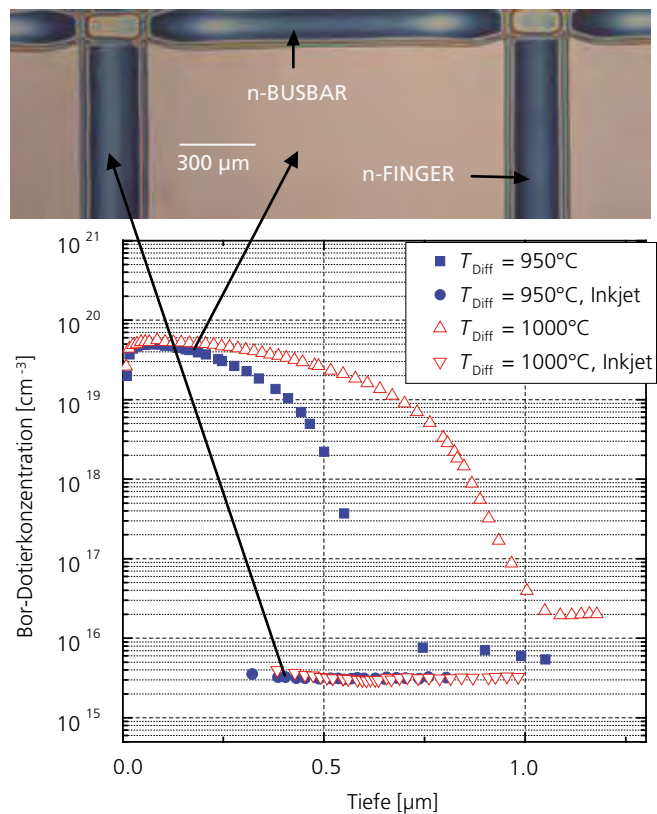
2 Die Hocheffizienz BC-BJ-Solarzelle verwendet n-Typ Si-Material und weist eine Vorderseite auf, die auf Lichteinfang und gute elektrische Eigenschaften optimiert ist. Der Emitter, das Back Surface Field (BSF) und beide Metallkontakte befinden sich auf der Rückseite der Solarzelle.



Die in der gegenwärtigen Industrieproduktion vorwiegend hergestellte Standardsolarzelle wird mit relativ wenigen und zum großen Teil einfachen und ganzflächig agierenden Prozessschritten hergestellt. Allerdings ist der Wirkungsgrad dieser Solarzellen hierdurch limitiert. Ein sehr hohes Wirkungsgradpotenzial besitzt die Rückseitenkontaktsolarzelle (BC-BJ, Abb. 1), mit dem einsammelnden Emittor und beiden Kontaktpolaritäten auf der Rückseite. Die Herausforderung besteht nun darin, die komplexere Solarzellenstruktur mit möglichst wenigen und industriell umsetzbaren Prozessschritten herzustellen.

Im Zuge dessen entwickeln wir einerseits Prozesscluster, die es erlauben, in einem Hochtemperaturschritt mehrere Dotierstrukturen einzutreiben (Co-Diffusion). Andererseits müssen diese Strukturen mit einer hohen Genauigkeit lokal hergestellt werden.

Dafür bietet sich das »Drop on Demand«-Prinzip der Inkjet-Technologie an, die auch in gewöhnlichen Tintenstrahl Druckern Verwendung findet und in der Industrie weit verbreitet ist. Diese kontaktlose Drucktechnologie ermöglicht es, Dotiergläser mittels Ätzmasken zurückzuätzen oder aber Diffusionsstoffe und Diffusionsbarrieren lokal zu verdrucken. Zu diesem Zweck wurde zunächst der Inkjet-Prozess auf das Verdrucken von Diffusionsbarrieren optimiert. Zur Erzeugung feiner Strukturen wurden für den Druckprozess verschiedenste Prozessparameter, z. B. die Druckauflösung, variiert. Damit lassen sich zuverlässig Dicke und Breite der Diffusionsbarrierenstruktur einstellen. Darüber hinaus konnten Parameter bestimmt werden, mit denen sich lokale Strukturen realisieren lassen, die eine optimale Barrierewirkung gegen Phosphor- sowie Bordiffusion aufweisen.



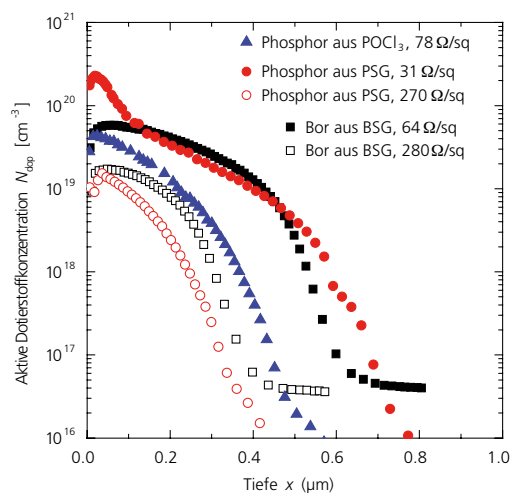
**3** Gedruckte Diffusionsbarriere zur Definition des n-Gebiets mit Dotierprofilen. Bei Diffusionstemperaturen  $T_{diff} \leq 1000$  °C verhindert die gedruckte Diffusionsbarriere vollständig die Diffusion von Bor in den Si-Wafer.



## SIMULTANE CO-DIFFUSIONSPROZESSE FÜR N-TYP SOLARZELLEN

Im Vergleich zu industriellen Solarzellen aus p-dotiertem Silicium weisen Solarzellen aus n-dotiertem Silicium ein erhöhtes Wirkungsgradpotenzial auf. Da zur Herstellung hocheffizienter n-Typ Solarzellen typischerweise mehrere sequenzielle Maskierungs- und Diffusionsschritte zur Ausbildung hoch n- bzw. p-dotierter Bereiche notwendig sind, ist der Fertigungsprozess jedoch aufwändig. Eine Möglichkeit zur Verringerung der Anzahl der benötigten Prozessschritte ist die Verwendung simultaner Co-Diffusionsprozesse, bei denen parallel zur Diffusion aus der Gasphase zuvor aufgebrachte dotierstoffhaltige Schichten als Diffusionsquelle dienen. Die Ausbildung der hochdotierten Bereiche erfolgt dann in einem einzigen Hochtemperaturschritt.

Daniel Biro, Arne Fallisch, Roman Keding, **Sebastian Mack**, Philip Rothhardt, Robert Woehl, Andreas Wolf, Ralf Preu



2 Dotierstofftiefenprofile, diffundiert aus einer gasförmigen ( $\text{POCl}_3$ ) oder abgeschiedenen (PSG oder BSG) Dotierstoffquelle. Für alle gezeigten Tiefenprofile wird der gleiche Hochtemperaturschritt zur Erzeugung verwendet.

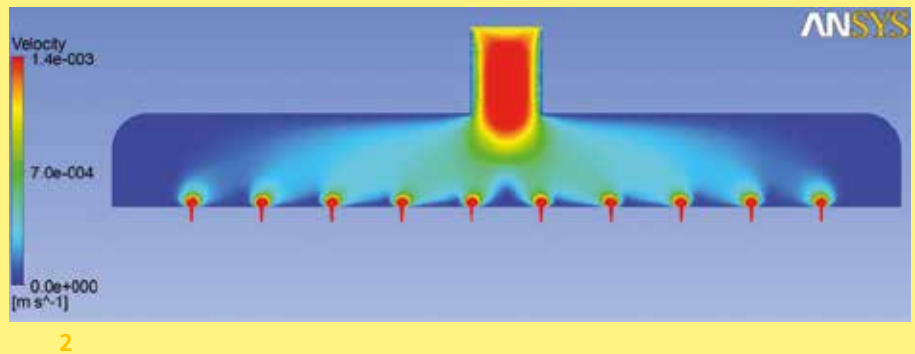
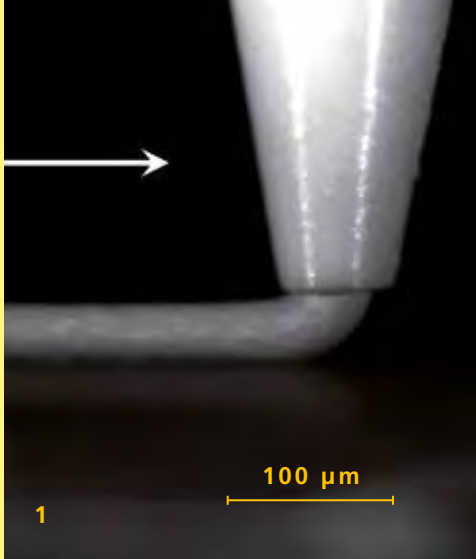
1 Industrieller Rohrfen für Bor-Diffusion und Co-Diffusionsprozesse zur Herstellung von n-Typ Silicium solarzellen im PV-TEC.

Gegenwärtig werden mehrere Solarzellenkonzepte für n-dotierte Siliciumwafer intensiv untersucht. Diese weisen zumeist hochdotierte Bereiche unterschiedlichen Dotiertyps auf der Vorder- und Rückseite des Wafers auf. Je nach Solarzellenkonzept werden dabei verschiedenste Anforderungen an die Oberflächenkonzentration und die Tiefe des Dotierprofils gestellt. Die Ausbildung der hochdotierten Bereiche erfolgt typischerweise durch Diffusion aus der Gasphase. Bei simultanen Co-Diffusionsprozessen wird zusätzlich schon vor dem Hochtemperaturschritt eine Feststoffdiffusionsquelle auf die Probe in Form einer dünnen Schicht aufgebracht, z. B. mittels plasmaunterstützter Gasphasenabscheidung (PECVD) oder einer Abscheidung bei Atmosphärendruck (APCVD).

Die Wahl der Prozessgase während der Abscheidung ermöglicht es, Phosphorsilikat- (PSG) oder Borsilikatgläser (BSG) als Feststoffdiffusionsquellen mit verschiedenen Dotierstoffkonzentrationen aufzubringen und damit eine n- oder p-Dotierung des Wafers in einem folgenden Hochtemperaturschritt zu erzeugen.

In Kombination mit der konventionellen Gasphasendiffusion, z. B. einer  $\text{POCl}_3$ - oder  $\text{BBr}_3$ -Diffusion, können durch Anpassung der Prozessparameter mit dieser Vorgehensweise auf derselben Probe sehr kostengünstig unterschiedliche Tiefenprofile verschiedenen Dotiertyps in einem einzigen Hochtemperaturschritt simultan erzeugt werden (Abb. 2). Im PV-TEC des Fraunhofer ISE stehen für solche Prozesse industrielle Rohröfen zur Verfügung (Abb. 1).

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



## NEUARTIGE DRUCKVERFAHREN FÜR INDUSTRIELLE SILICIUMSOLARZELLEN

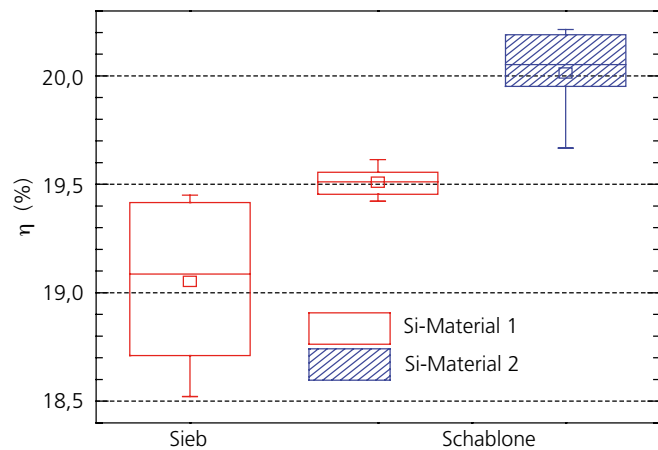
Zur Stromentnahme werden bei Siliciumsolarzellen sowohl auf der Vorder- als auch der Rückseite Metallkontakte aufgebracht. Auf der Vorderseite ist es wesentlich, eine hohe Leitfähigkeit der Kontaktfinger bei gleichzeitig möglichst geringer Abschattung der Solarzelle zu erzielen. Neben der kontinuierlichen Verbesserung des Siebdruckverfahrens, das in der industriellen Solarzellenherstellung zur Metallisierung fast ausschließlich verwendet wird, arbeiten wir mit Hochdruck an der Entwicklung neuartiger Druckprozesse, insbesondere dem Schablonendruck-, dem Dispensierverfahren und an Rotationsdruckverfahren.

Daniel Biro, Florian Clement, Denis Erath, Harald Gentischer, Boris Hamouda, Markus Klawitter, Martin Kuchler, Michael Linse, Elmar Lohmüller, Andreas Lorenz, **Maximilian Pospischil**, Jan Specht, Benjamin Thaidigsmann, Ralf Preu

Beim Schablonendruck mit Hybridschablonen wird die Metallpaste in einem Druckschritt durch ein fein strukturiertes Blech gepresst, das auf der Unterseite mit einer Emulsion beschichtet ist. Dabei wird die Gitterstruktur des Blechs durch dünne Stege zusammengehalten. Mit diesem Verfahren ist es möglich, sowohl die Homogenität der Kontaktfinger zu verbessern, als auch die Schichtdicke bei gleichbleibender Kontaktbreite zu erhöhen. Die dadurch erhöhte Fingerleitfähigkeit ermöglicht Wirkungsgradvorteile von bis zu 0,3 % abs. im Vergleich zum Standard-Siebdruckverfahren. Mit beidseitig passivierten HIP-MWT Solarzellen, hergestellt aus großflächigen p-Typ Cz-Siliciumwafern, konnten mittels Schablonendruckverfahren bereits Wirkungsgrade bis zu 20,2 % erzielt werden (Abb. 3).

Eine weitere mögliche Alternative zum etablierten Siebdruckverfahren bietet das Dispensierverfahren, das angewandt auf MWT-PERC Solarzellen aus p-dotiertem FZ-Silicium bereits

- 1 Hochgeschwindigkeitsaufnahme einer Dispensiernadel.
- 2 Simuliertes Geschwindigkeitsprofil eines 10fach Paralleldispens-Druckkopfs.



- 3 Wirkungsgradverteilung großflächiger HIP-MWT-Solarzellen, aus zwei verschiedenen Cz-Si-Materialien (156 x 156 mm<sup>2</sup>). Die Vorderseitenmetallisierung mit Hybridschablonen ermöglicht Wirkungsgradsteigerungen und erhöhte Prozessstabilität.

Wirkungsgrade bis zu 20,6 % ermöglicht. Hierbei wird die Metallpaste durch eine sich über dem Wafer bewegende dünne Dosiernadel gedrückt und linienweise aufgetragen (Abb. 1). Dadurch können Homogenität und Fingergeometrie nochmals verbessert (Linienbreiten unter 40 µm bereits demonstriert) und die mechanische Belastung für den Wafer deutlich reduziert werden. Mithilfe rheologischer Untersuchungen und anschließender fluiddynamischer Simulationen (Abb. 2) ist es uns gelungen, den Dispensierprozess realitätsnah abzubilden und daraus Rückschlüsse für eine folgende Skalierung des Druckkopfes zu ziehen.

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



## MESSTECHNIK FÜR DIE SILICIUM-DÜNNSCHICHTTECHNOLOGIE

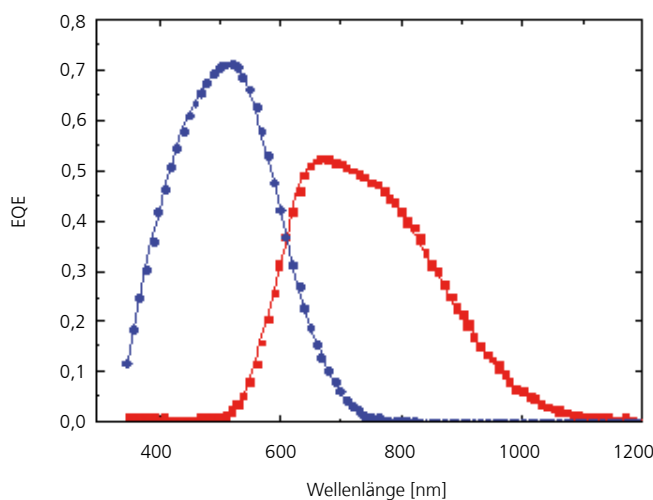
Am Fraunhofer ISE Labor- und Servicecenter (LSC) Gelsenkirchen haben wir 2012, parallel zur Erweiterung der Silicium-Dünnschichttechnologie, unsere Messtechnik speziell für die Schichtcharakterisierung und Vermessung von Dünnschichtsolarzellen weiter ausgebaut. Ziel ist es, die wichtigsten Eigenschaften von amorphen und mikrokristallinen Siliciumschichten vor Ort messen zu können. Ein neu entwickelter Messblock ermöglicht uns die vollautomatische Messung der Hell- und Dunkelkennlinien unserer Dünnschichtsolarzellen.

**Dietmar Borchert**, Martina Dörental, Stefan Hohage, Sven Holinski, Sinje Keipert-Colberg, Britt-Marie Meiners, Amada L. Montesdeoca-Santana, Markus Rinio, Petra Schäfer, Ralf Preu

1 *BlockIV-System zur Vermessung von Hell- und Dunkelkennlinien von Silicium-Dünnschichtzellen.*

Wir haben unser **FAKIR System** zur schnellen Messung von Schichtwiderständen speziell für die Vermessung von transparenten, leitenden Oxidschichten optimiert. Das FAKIR System ist zehnmals schneller als konventionelle Systeme.

Für die Bestimmung der Schichtqualitäten unserer amorphen und mikrokristallinen Siliciumschichten messen wir mit unserem **SigmaT-Messplatz** die Temperaturabhängigkeit der Leitfähigkeit. Die aus dieser Messung ermittelten Hell- und Dunkelkennlinien bei Raumtemperatur sind ein wichtiges Qualitätskriterium für die Güte unserer Abscheideprozesse.



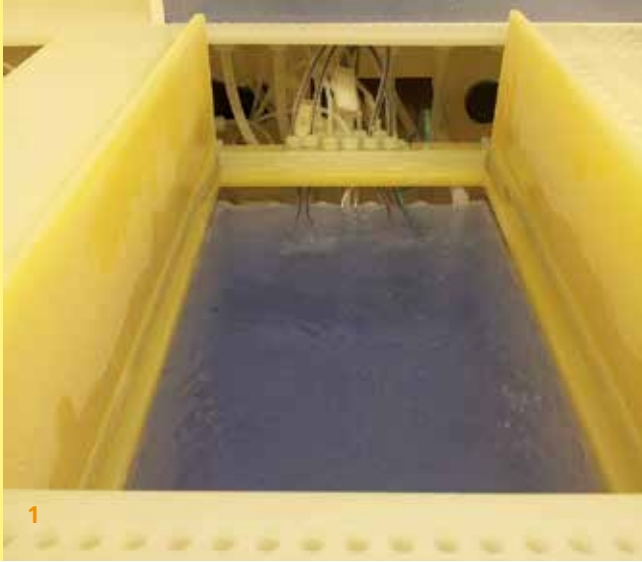
2 *Externe Quanteneffizienz (EQE) einer Silicium-Tandemzelle gemessen mit dem SpecLab-System. In Blau dargestellt die Quanteneffizienz der oberen Teilzelle, in Rot die der unteren Zelle.*

Auf unserem **SpecLab-System** haben wir zwei Messmethoden implementiert. Zum einen vermessen wir die spektrale Empfindlichkeit bzw. die externe Quanteneffizienz (EQE) unserer Dünnschichtsolarzellen. Zum anderen haben wir in das System die CPM-Methode (Constant Photocurrent Method) integriert. Sie erlaubt die Bestimmung der Defektdichte in amorphen Siliciumschichten.

Für die Vermessung der Hell- bzw. Dunkelkennlinien haben wir einen **speziellen Messblock (BlockIV)** entwickelt, der eine automatische Vermessung aller Einzelzellen auf unseren Testsubstraten erlaubt. Der Block verfügt über eine interne Temperierung, die Einzelzellen werden von der Messsoftware über eine automatische Schaltbox angesteuert.

Alle von uns entwickelten Messsysteme bauen wir auf Wunsch auch für unsere Projektpartner und externe Kunden auf.





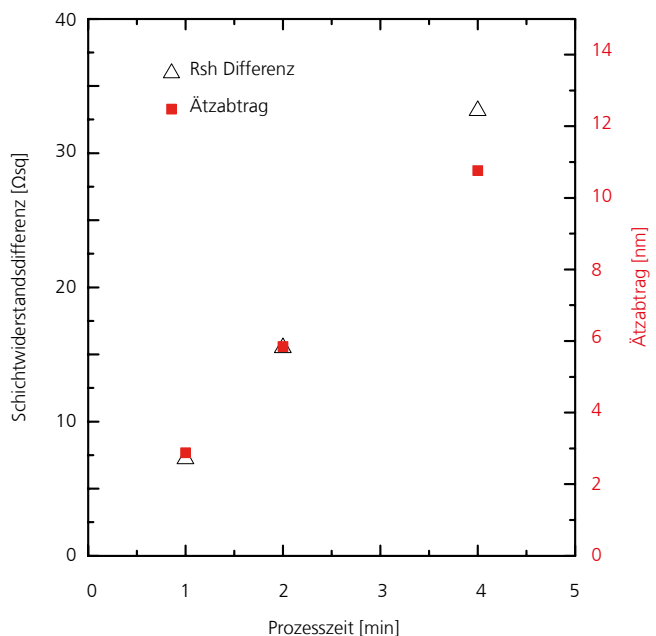
## MULTIFUNKTIONALE O<sub>3</sub>-BASIERTE REINIGUNGEN FÜR SOLARZELLEN

**Wirksame Reinigungen zur Entfernung von metallischen Verunreinigungen sind eine wichtige Voraussetzung für die Herstellung hochwertiger Passivierungen auf der Oberfläche von kristallinen Hocheffizienz-Siliciumsolarzellen. Reinigungsbäder auf der Basis von Wasserstoffperoxid werden bei hohen Temperaturen betrieben und reinigen sehr effizient. Aufgrund der hohen Prozesstemperatur kommt es jedoch zu einem schnellen Zerfall des Wasserstoffperoxids. Durch Nachchargieren des zerfallenen Wasserstoffperoxids kann zwar die Konzentration konstant gehalten werden, der hohe Chemikalienverbrauch macht derartige Prozesse jedoch unwirtschaftlich. Ozon-basierte Reinigungsbäder sind vielseitig anwendbar und kostengünstig.**

Anamaria Moldovan, Jochen Rentsch, **Martin Zimmer**, Ralf Preu

Der Ersatz von Wasserstoffperoxid durch Ozon eröffnet prozesstechnisch völlig neue Wege: Ozon als starkes Oxidationsmittel kann bereits bei niedrigen Temperaturen und Konzentrationen die Funktion des Wasserstoffperoxids übernehmen. In einer automatisierten Batch-Prozessanlage wurde ein an die Bedürfnisse der Photovoltaikindustrie angepasster Ozongenerator-Prototyp eingebaut, der aus Sauerstoff kontinuierlich Ozon erzeugt und ins Prozessbad nachspeist. Um die oxidierten Verunreinigungen in Lösung zu bringen, wird ein System aus verdünnter Salz- und Flusssäure verwendet. Die Zugabe von Salzsäure unterstützt das Lösevermögen oxidierter Metalle, Flusssäure ätzt, in Kombination mit Ozon, kontrolliert einige Nanometer der Siliciumoberfläche ab. Dies führt zu einer Freilegung von dicht unter der Oberfläche liegenden Verunreinigungen und somit zu einer Tiefenwirkung der Reinigung. Zum anderen kann der Effekt genutzt werden, um die Oberflächenkonzentration eines evtl. bereits existierenden Emitters zu justieren.

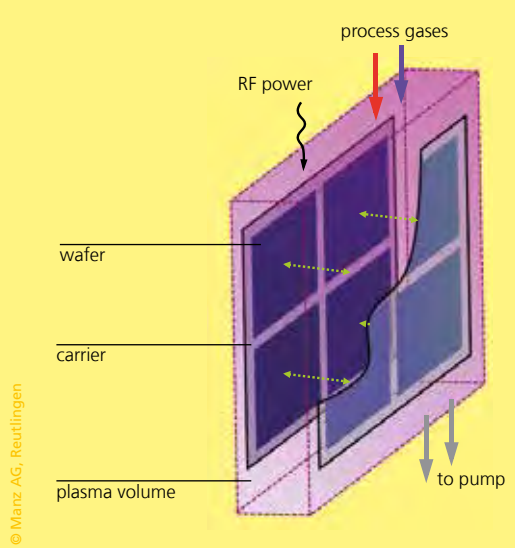
1 Prozessbecken mit blau-violett leuchtendem ozonisiertem Wasser.



2 Abhängigkeit der Schichtwiderstandsdifferenz und des Ätzabtrags von der Ozonkonzentration (bei 1 Minute Prozesszeit und gleichbleibender Flusssäure- und Salzsäurekonzentration).

Da sich Ätz- und Reinigungswirkung durch verschiedene Parameter separat voneinander einstellen lassen, kann mit derartigen Ozon-basierten Reinigungsprozessen nicht nur eine Vereinfachung und Kostenreduktion im Vergleich zu bisherigen Reinigungsprozessen erzielt werden, es können darüber hinaus auch Reinigungs- und Konditionierschritte zusammengefasst werden, was eine weitere Vereinfachung von Prozessketten für hocheffiziente Solarzellen ermöglicht.

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



© Manz AG, Reutlingen

# ANTIREFLEX- UND PASSIVIERUNGSSCHICHTEN AUS PLASMAABSCHIEDUNGEN

In Kooperation mit der Manz AG haben wir ein hochdurchsatzfähiges Vakuum-Anlagen- und Prozesskonzept zur Herstellung dünner funktionaler Schichten für die c-Si-Photovoltaikindustrie entwickelt. Erstes Ziel des Projekts waren hochqualitative Siliciumnitridschichten für die Antireflexbeschichtung der Solarzellen. Uns ist es gelungen, hohe Schichtdichten bereits bei geringen Prozesstemperaturen und hohe Beschichtungsraten zu erreichen.

**Marc Hofmann**, Norbert Kohn, Saskia Kühnhold, Jochen Rentsch, Pierre Saint-Cast, Daniel Trogus, Dirk Wagenmann, Ralf Preu

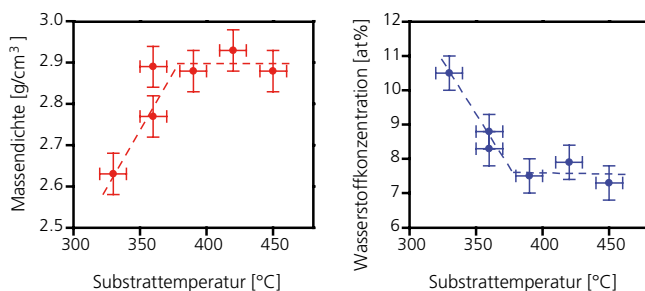
Zur Entspiegelung kristalliner Siliciumsolarzellen bietet es sich an, eine dünne Schicht mit einem Brechungsindex im Bereich von 2,1 und einer Dicke von etwa 80 nm zu verwenden. Wasserstoffhaltiges Siliciumnitrid ( $\text{SiN}_x\text{:H}$ ) ist als Material sehr gut geeignet, da es neben den gewünschten optischen Eigen-

1 Beschichtungsanlage im industriellen Maßstab, wie sie von der Manz AG basierend auf dem Projektergebnis entwickelt worden ist. Blick in das Waferhandlingsystem der PECVD-Anlage (links). Schema des Aufbaus der Prozesskammer, in der die Beschichtung durchgeführt wird (rechts).

schaften auch eine Verbesserung der Volumenqualität von multikristallinen Solarzellen (Volumenpassivierung) und eine Oberflächenpassivierung gewährleisten kann.  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schichten werden aus diesem Grund vielfach in der c-Si-PV-Industrie eingesetzt.

Die Manz AG entwickelte in Kooperation mit dem Fraunhofer ISE ein neues innovatives Anlagenkonzept zur Vakuum-Abscheidung dünner funktionaler Schichten über plasmaangeregte chemische Gasphasenabscheidung (PECVD). Die Anlage zeichnet sich durch folgende Spezifika aus:

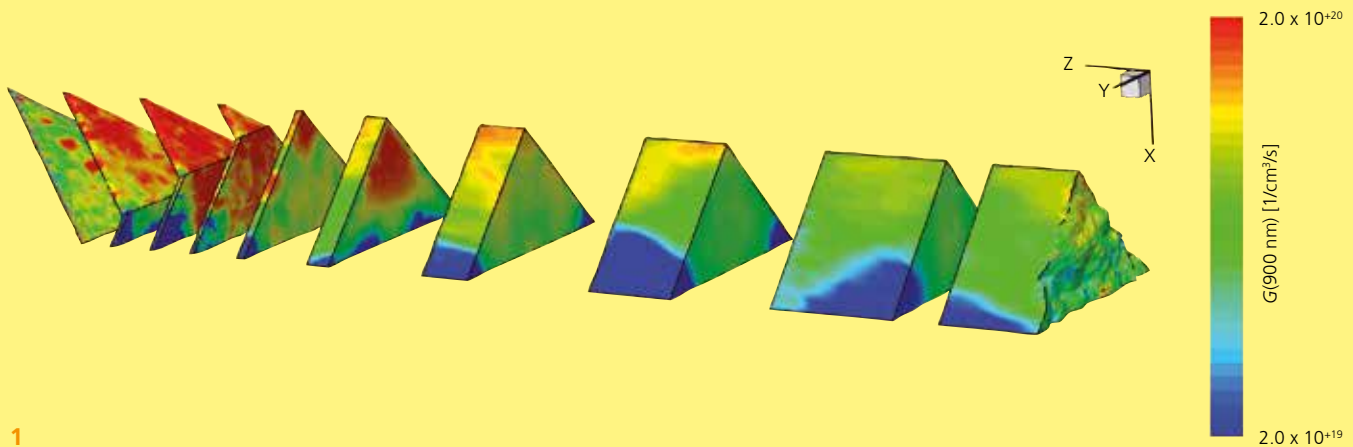
- Hochleistungsplasma: sehr effiziente Zerlegung der Prozessgase und damit hoher Gasausnutzungsgrad und hohe Abscheiderate
- vertikale, verschattungsfreie Halterung der Wafer während der Beschichtung: homogene Abscheidung der Schichten ohne Haltemarken
- gleichzeitige Beschichtung von Wafern auf zwei Carriern, rechts und links der Plasmazone: sehr hohe Gasausnutzung



2 Massendichte der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schichten in Abhängigkeit der Substrattemperatur während der Abscheidung (links). Wasserstoffgehalt der  $\text{SiN}_x\text{:H}$ -Schichten in Abhängigkeit der Substrattemperatur während der Abscheidung (rechts). Alle Schichten besitzen etwa den gleichen Brechungsindex von 2,1.

Ein zusätzlicher Vorteil der Hochleistungsplasmatechnologie ist die Möglichkeit der Herstellung von Schichten mit hoher Massendichte auch bei relativ niedrigen Prozesstemperaturen unterhalb von 400 °C.

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

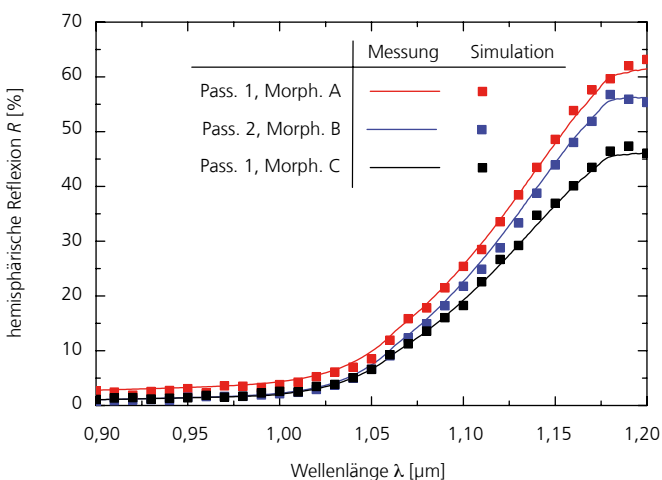


1

## OPTISCHE SIMULATION PASSIVIERTER SOLARZELLEN MIT RAUER RÜCKSEITE

Solarzellen mit dielektrischer Vorder- und Rückseitenpassivierung vereinen hervorragende elektrische und optische Eigenschaften miteinander. Die Rauheit und die Beschichtung der Solarzellenrückseite sind dabei ausschlaggebende Parameter für den Wirkungsgrad. Die von uns verwendete physikalische Simulation des optischen Einflusses dieser Parameter erlaubt es erstmals, für gegebene Passivierungsschichten und Oberflächenstrukturen die spektrale hemisphärische Reflexion und den in der Solarzelle generierten Strom vorherzusagen, wie der Vergleich der Simulationen mit Messungen zeigt. Die optischen Eigenschaften verschiedener Beschichtungsmaterialien und Rückseitenmorphologien auf der Solarzelle können daher mittels Simulationen bereits am Computer analysiert und optimiert werden.

Johannes Greulich, Stefan Rein, Christoph Schwab, Nico Wöhrle, Ralf Preu



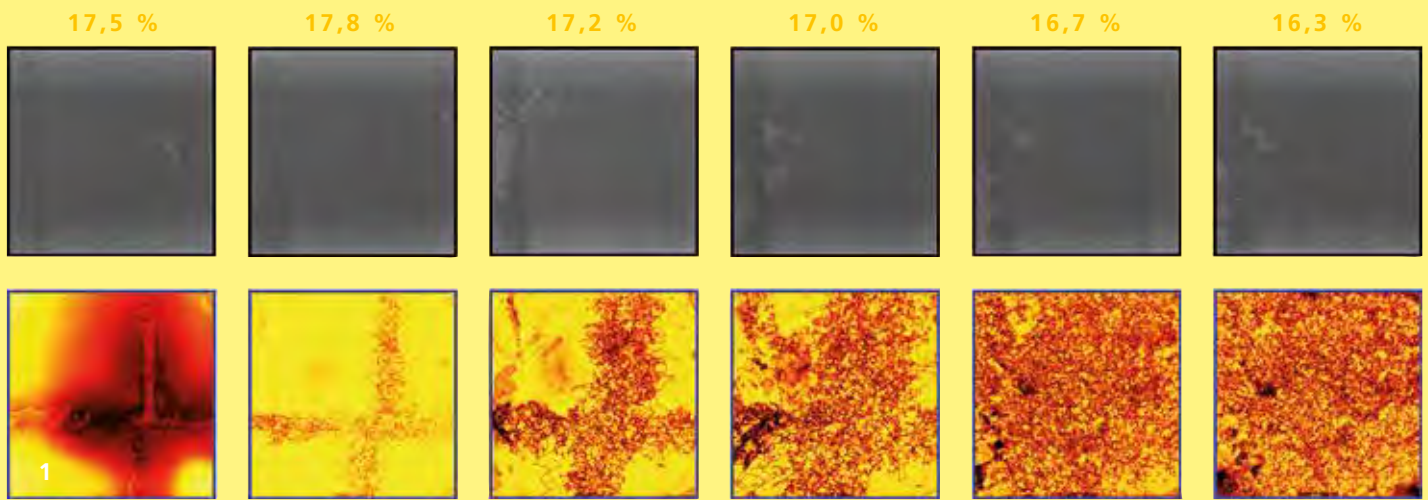
2 Die simulierte Reflexion stimmt präzise mit der gemessenen überein, hier exemplarisch für drei Rückseitenmorphologien (A, B, C) und zwei Passivierungsstapel (1, 2) dargestellt.

1 Die hier nur in ausgewählten Tiefen des optischen Symmetrieelements mit einer Viertel-Pyramide (links) und der rauhen Rückseite (rechts) für  $\lambda = 900 \text{ nm}$  dargestellte, ortsauflöste Generationsrate lässt sich mit dem physikalischen Ansatz präzise simulieren.

Um die Eigenschaften von rauen Solarzellenrückseiten zu beschreiben, wurde bislang das Phong-Beleuchtungsmodell verwendet. Meist können die zwei freien Parameter des Phong-Modells so gewählt werden, dass die Simulation der spektralen Reflexion der zu modellierenden Solarzellen mit der Messung übereinstimmt. Aufgrund dieses empirischen Charakters des Phong-Modells ist es nur sehr eingeschränkt möglich, die optischen Eigenschaften von Solarzellen mit rauen Rückseiten vorherzusagen.

Der neue Ansatz zur Simulation der optischen Eigenschaften rauer Oberflächen mit dielektrischen Passivierungsschichten besteht darin, zunächst das dreidimensionale Höhenprofil der Oberfläche, z. B. mit einem konfokalen Mikroskop, genau zu bestimmen. Das Höhenprofil wird anschließend in kleine Dreiecke zerlegt und in das Symmetrieelement der optischen Simulation eingebaut (Abb. 1). In der als Strahlverfolgung durchgeführten Simulation wird das Auftreffen eines Strahls auf ein solches kleines Dreieck entsprechend dem Snellius'schen Brechungsgesetz und den Fresnel'schen Gleichungen mit dem Transfermatrix-Formalismus beschrieben. Dabei werden als Eingangsgrößen nur die Brechungsindizes und die Dicken der Rückseitenbeschichtungen benötigt. Dies ermöglicht es, mit diesem Ansatz Vorhersagen über die Ladungsträgergeneration (Abb. 1) und die Reflexion (Abb. 2) zu treffen, die ohne Anpassung von Parametern präzise mit den Messungen übereinstimmen.

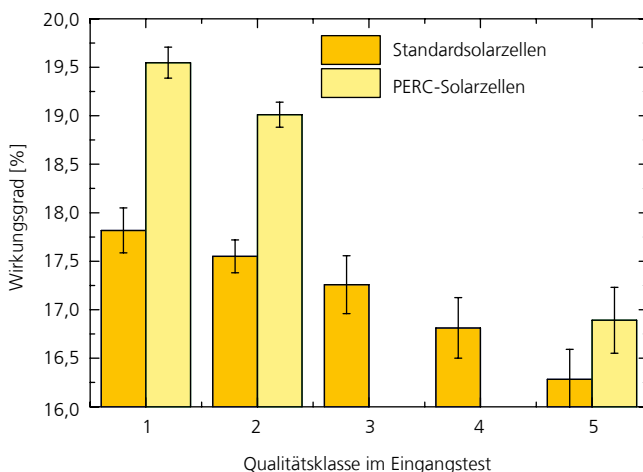
Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.



## PL-BASIERTE QUALITÄTSKONTROLLE VON QUASI-MONO WAFERN

Quasi-mono Silicium, das seit zwei Jahren als neue Materialklasse Einzug in die Solarzellenfertigung hält, soll die Kostenvorteile des multikristallinen Siliciums mit den Qualitätsvorteilen des monokristallinen Siliciums vereinen und so hohe Wirkungsgrade bei geringeren Herstellungskosten ermöglichen. Das Fraunhofer ISE hat quasi-mono Wafer verschiedener Hersteller untersucht und deutliche Qualitätsunterschiede festgestellt. Die Wirkungsgrade reichen von 15,7 % bis 18,1 % für Standardsolarzellen und von 16,3 % bis 19,7 % für Solarzellen mit passivierter Rückseite. Diese Unterschiede konnten auf diverse Materialdefekte zurückgeführt werden, welche die Möglichkeit einer zuverlässigen Qualitätsbewertung vor Beginn der Solarzellenfertigung eröffnen.

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



2 Mittlere Solarzelleneffizienz zweier Solarzellenprozesse aufgetragen gegen die Qualitätsklasse, die in einem PL-Imaging basierten Eingangstest festgestellt wurde.

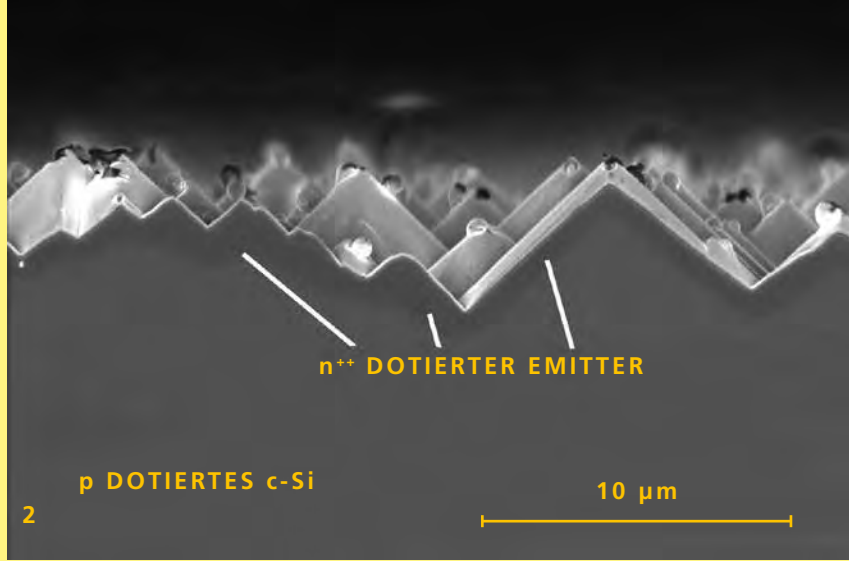
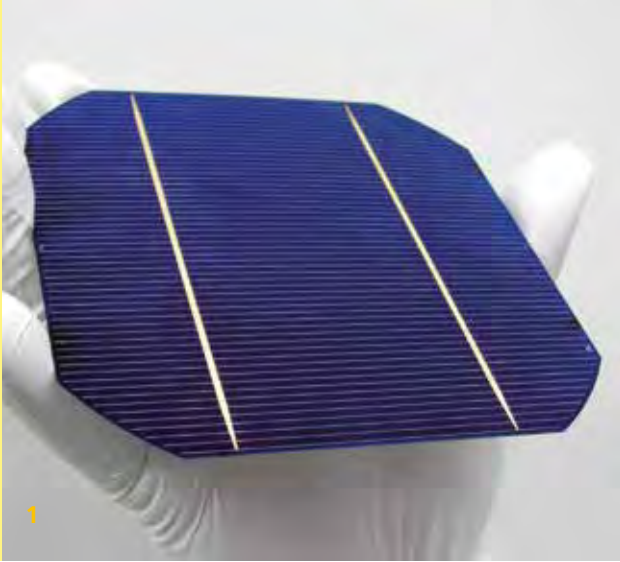
1 Fotos (oben) und PL-Bilder (unten) von quasi-mono Wafern aus verschiedenen Positionen der Säule vom Boden (links) zur Kappe (rechts). Während die Fotos gleichbleibend hohe Qualität aufweisen, zeigen die PL-Bilder zur Kappe hin eine starke Zunahme an Versetzungen.

Das Fraunhofer ISE hat quasi-mono Wafer verschiedener Hersteller untersucht, um die Eignung dieser neuen Materialklasse zu prüfen, begrenzende Defekte zu identifizieren und eine Qualitätsbewertung zu entwickeln.

Abb. 1 zeigt eine Serie von Wafern vom Boden bis zur Kappe einer Säule. Wie an den Digitalbildern (oben) zu sehen ist, bleibt die monokristalline Struktur der Wafer entlang der gesamten Säule gut erhalten. Dennoch werden in den Photolumineszenz (PL)-Aufnahmen (unten) rekombinationsaktive Defekte in einem kreuzförmigen Bereich sichtbar, der sich mit zunehmender Säulenhöhe über den ganzen Wafer ausbreitet und einen kontinuierlichen Rückgang der resultierenden Wirkungsgrade von 17,8 % auf 16,3 % zur Folge hat. Physikalische Ursache sind Kristallbaufehler, sogenannte Versetzungen, die von den Stoßkanten nicht optimal ausgerichteter Saatplatten ausgehen.

Da die limitierenden Defekte bereits anhand von PL-Bildern der as-cut Wafer identifiziert werden können, ist eine Qualitätsbewertung im Eingangstest theoretisch möglich. Anhand der Strukturen in den PL-Bildern wurden die Wafer probeweise in fünf verschiedene Klassen aufgeteilt und zu Standardsolarzellen mit Aluminium-Back-Surface-Field (Al-BSF) bzw. Solarzellen mit passivierter Rückseite (PERC) prozessiert. Abb. 2 zeigt, dass sich die Abstufung dieser experimentell ermittelten Qualitätsklassen für beide Prozesse sehr deutlich in kontinuierlich abnehmenden Wirkungsgraden widerspiegelt. Zusätzlich erlaubt die PL-Analyse auch eine Optimierung der Kristallisation, da Startpunkt, Ausbreitung und Einfluss der Defekte im Kristall genau bestimmt werden können.





# LASERDIFFUSION FÜR SOLARZELLEN AUS KRISTALLINEM SILICIUM

Durch selektive Laserdiffusion können lokal veränderte Dotierstrukturen in kristallinen Siliciumsolarzellen hergestellt werden. Am Fraunhofer ISE wurden Prozesse entwickelt, die es ermöglichen, Hochdotierungen unter den Metallkontakten in hocheffizienten Solarzellen zu erzeugen und somit die Kontaktqualität zu verbessern. Zusätzlich werden durch die eingebrachte hohe Dotierung Verluste von Ladungsträgern durch Rekombination am Metall-Halbleiterkontakt unterdrückt.

Susana Fernandez Robledo, **Ulrich Jäger**, Jan Nekarda, Andreas Wolf, Ralf Preu

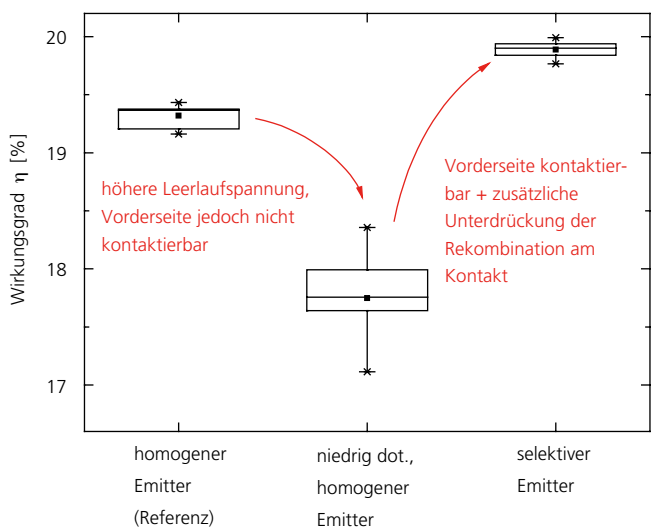
Mittels laserinduzierter Diffusion können in kurzer Zeit ( $t < 10 \mu\text{s}$ ) Dotierungen von bis zu mehreren Mikrometern Tiefe erreicht werden. Grund hierfür ist, dass in der flüssigen Phase Diffusionsprozesse in kristallinem Silicium um bis zu zehn Größenordnungen schneller ablaufen können, als in der festen Phase.

Solarzellen mit passivierten Oberflächen weisen ein hohes Wirkungsgradpotenzial auf, da in diesem Konzept, neben der Implementierung einer optimierten Optik für die Rückseite der Zelle, zusätzlich Rekombinationsverluste verringert werden. Dies geschieht durch die Passivierung der Oberflächen und die Verwendung niedrig dotierter Phosphoremitter. Diese erlauben jedoch keinen ausreichenden, elektrischen Kontakt zu Silberpasten, die üblicherweise auf der Vorderseite einer Solarzelle mittels Siebdruck aufgetragen werden. Durch eine selektive Nachdotierung mit dem Laser kann unter den Kontakten ein erhöhtes Niveau an Dotierung eingebracht werden und so ein ohmscher Kontakt zwischen Emitter und Vorderseitenelektrode sichergestellt werden. Aufgrund der hohen Dotierung unter dem Metallkontakt werden durch den Feldeffekt die Ladungsträger vom hochrekombinativen Metall-Halbleiterkontakt abgehalten. Dies senkt den Rekombi-

- 1 Vorderseite einer monokristallinen p-Typ Solarzelle mit passivierten Oberflächen und laserdotiertem, selektivem Emitter mit einem Wirkungsgrad von 20 %.
- 2 REM-Aufnahme einer mit dem Laser erzeugten Hochdotierung auf texturierter, monokristalliner Siliciumoberfläche.

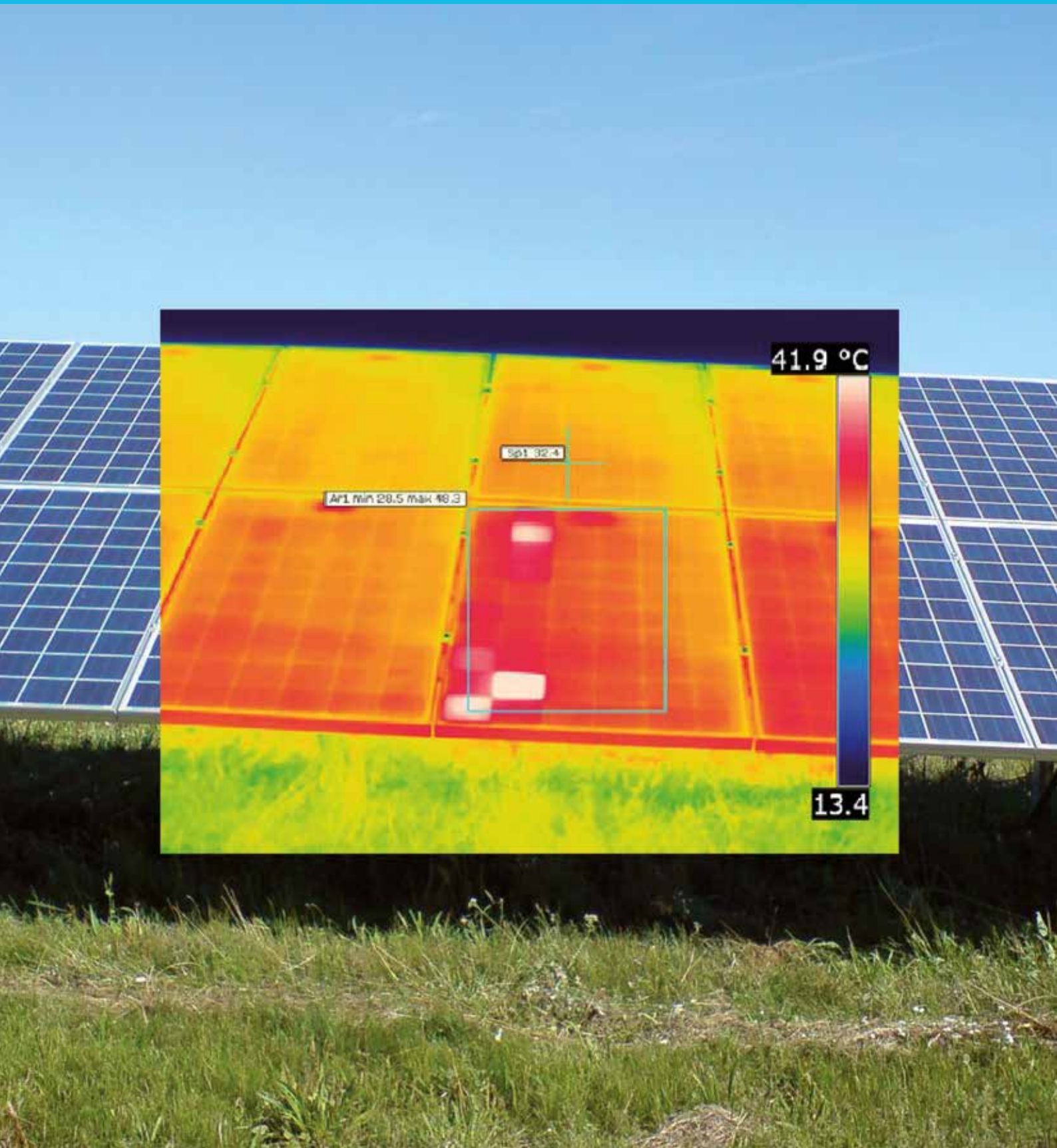
nationsstrom der Zelle zusätzlich ab und erlaubt höhere Leerlaufspannungen. Somit können durch laserdotierte, selektive Emitter-Strukturen höchste Wirkungsgrade erreicht werden. Im Vergleich zu einem homogen dotierten Emitter konnte der Wirkungsgrad von beidseitig kontaktierten Solarzellen mit passivierten Oberflächen um bis zu 0,6 % gesteigert werden, wobei Wirkungsgrade von bis zu 20,0 % erreicht wurden.

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



- 3 Wirkungsgradvorteil durch Implementierung eines selektiven Emitters in Solarzellen mit passivierten Oberflächen. Durch die Einführung einer Hochdotierung unter den Kontakten kann die Zelleffizienz gegenüber der Referenz gesteigert werden.

# STROM AUS SONNENLICHT



41.9 °C

Sp1: 32.4

Ar1 min 28.5 max 48.3

13.4

# 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 Photovoltaik Modul-Technologiecenter (MTC) verfügt über 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, Schlibfbilder und hochauflösende Röntgenaufnahmen geprüft werden; die Qualität des Laminationsprozesses anhand von DMA-, DSC- und Gelgehaltsbestimmungen. 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 Simulationsmodelle. 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 mithilfe 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 CalLab PV Modules eine Vielzahl an Standard- und Präzisionsmessungen für Forschung, Entwicklung und Produktion an. Das CalLab PV Modules des Fraunhofer ISE zählt mit einer Messunsicherheit von weniger als 1,8 % 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.

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

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

---

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

---



## RÜCKKONTAKT-MODULTECHNOLOGIE MIT STRUKTURIERTEN ZELLVERBINDERN

Neuartige Hocheffizienzsolarmodule mit rückseitigen Kontakten stellen für die Modultechnologie eine große Herausforderung dar. Die einseitige Verschaltung mit konventionellen Flachdrähten führt zu starken mechanischen Spannungen und Verwölbungen. Das am Fraunhofer ISE entwickelte Konzept der strukturierten Zellverbinder vermeidet dies durch ein spezielles Design. Es konnte an 120 µm dünnen MWT-Zellen erfolgreich umgesetzt werden. Die Demonstrationsmodule erreichen Wirkungsgrade von 17% bei einem Zell-zu-Modul-Verlust von lediglich 1% absolut. Der Vorteil gegenüber einer leitfähigen Rückseitenfolie liegt in der nur geringfügigen Modifikation des Standardmodulkonzepts. Mehrkosten- und Materialzuverlässigkeitsrisiken sind deutlich reduziert.

Dirk Eberlein, Ulrich Eitner, Ingrid Hädrich, Marco Trinitz, Martin Wiese, Harry Wirth



2 FEM-Simulation des Stromtransports in einem strukturierten Zellverbinder: ohmsche Verluste (Farbe), Stromrichtungen (Pfeile).

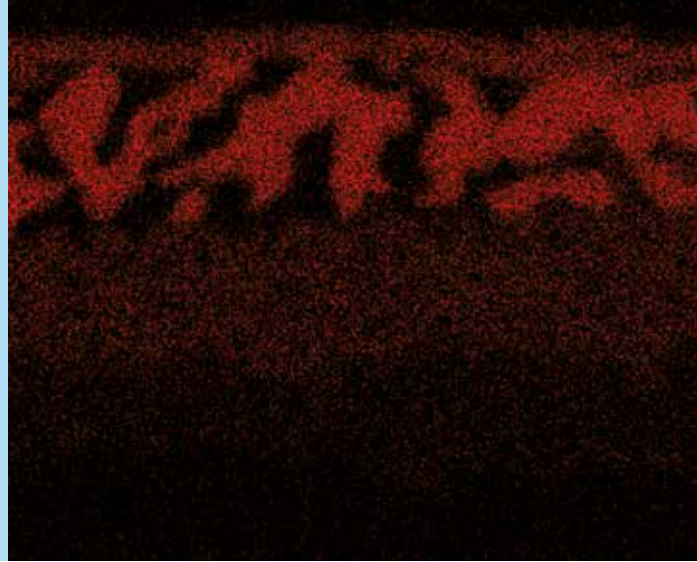
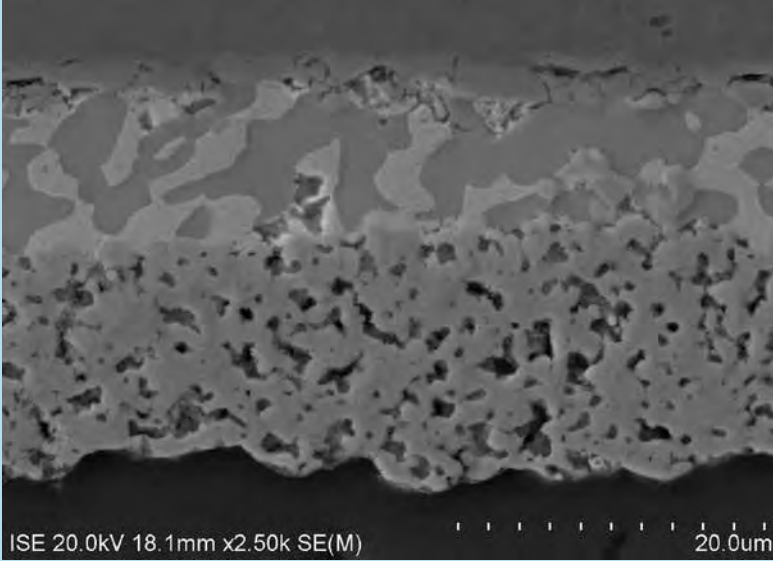
1 MWT-Rückkontaktmodul mit Verschaltungstechnologie auf Basis des strukturierten Zellverbinders.

Hohe Zellwirkungsgrade helfen, die flächenproportionalen Kosten im Modul und später im System zu reduzieren – beides senkt die Gestehungskosten für PV-Strom. Für die Integration von hocheffizienten MWT-Rückkontaktsolarmodulen in Module gibt es verschiedene Konzepte, von denen sich bisher keines am Markt durchgesetzt hat. Unser Modulkonzept ist so angelegt, dass die Fertigungsprozesse und verwendeten Materialien sehr nah am Standardmodulkonzept sind. Das senkt die Markteintrittsschwelle und Modulzuverlässigkeitsrisiken.

Das Design des Zellverbinders sieht eine Trennung von elektrisch leitenden Elementen und zu lötfähigen Kontaktstellen vor. Es ermöglicht niedrige ohmsche Verluste durch genügend große Leitungsquerschnitte bei gleichzeitig verringerter thermomechanischer Spannung nach dem Lötprozess. Eine spezielle EVA-Schicht zwischen Zellrückseite und Verbinder verhindert, dass Kurzschlüsse entstehen. Für die Designoptimierung wird ein FEM-Simulationsmodell verwendet, das auf partiellen Differentialgleichungen der Elektrostatik beruht.

Anhand von Demonstratormodulen im 10- und 16-Zellenformat konnten Wirkungsgrade von 17.0% und Füllfaktoren von 77.7% erreicht werden. Qualitative Untersuchungen wie Elektrolumineszenzaufnahmen (EL) bestätigen die Unversehrtheit des Moduls nach den einzelnen Produktionsprozessen. Auch nach beschleunigter Alterung mit 200 Temperaturzyklen zwischen -40°C und +85°C konnte kein Leistungseinbruch und kein Schaden in der EL-Aufnahme festgestellt werden.

Das Projekt wurde von der Europäischen Union im 7<sup>th</sup> Framework Programme im Rahmen des Projekts »Ultimate« unterstützt.



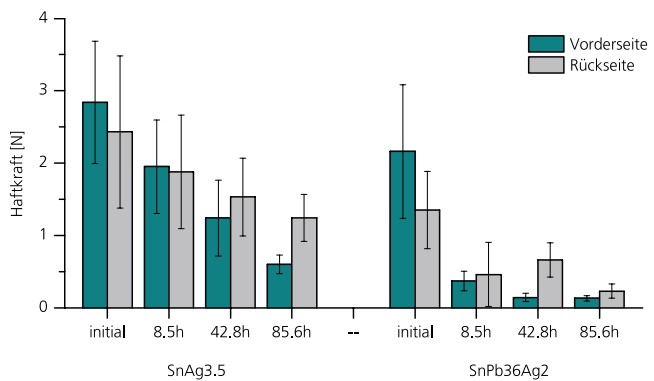
# ZUVERLÄSSIGKEIT VON ZELLMETALLISIERUNGEN IM PV-MODULBAU

Zellmetallisierungen dienen als Substrat zur elektrischen Kontaktierung von Solarzellen und sind damit ein zentraler Faktor für die Modulintegration. Löten ist die industrieübliche und bewährte Kontaktierungstechnologie. Aktuell werden neuartige Metallisierungskonzepte, Füge-technologien und Materialien für ihre Verwendung in der Photovoltaik intensiv bewertet. Treibende Kräfte für die Substitution sind Kostendruck (z. B. durch teure Rohstoffe wie Silber) sowie ökologische Risiken. Die umfassende Untersuchung der Zuverlässigkeit von Lötstellen ist von besonderer Wichtigkeit. Ein wesentlicher Einflussfaktor auf die Stabilität sind Diffusionsprozesse in den Fügekomponenten.

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

Die Qualität und Zuverlässigkeit von Lötstellen werden in großem Maße durch Diffusionsprozesse während ihrer Lebensdauer beeinflusst. Dies führt zur Ausbildung intermetallischer Phasen und zur Diffusion von Lotbestandteilen (Zinn) in die Metallisierung. Intermetallische Phasen sind Verbindungen, die aus Materialien der Füge-stelle (Zinn, Silber und Kupfer) bestehen und die sich in ihren Eigenschaften von den Ausgangsmetallen unterscheiden. Diese Phasen bilden sich im Lot und an der Grenzfläche zur Zellmetallisierung und zum Kupferkern des Zellverbinders. Sie beeinflussen die mechanischen und elektrischen Eigenschaften der Lötstelle. Der deutliche Einfluss der Diffusion von Zinn in die poröse Matrix der Metallisierung auf die mechanischen Eigenschaften konnte nachgewiesen werden. Mit optischen Qualifizierungsmethoden und Schälprüfungen wurde eine Korrelation zwischen Diffusion und mechanischer Zuverlässigkeit der Lötstellen hergestellt. Die Degradationsvorgänge wurden mithilfe von isothermer Auslagerung über unterschiedliche Zeitspannen beschleunigt. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Menge

1 REM-Aufnahme eines Querschliffs einer bleihaltigen Lötstelle nach Warmlagerung (links) mit korrespondierender Zinnverteilung, gemessen mit EDX (rechts).



2 Lötstellen nach isothermer Warmlagerung zeigen eine Verringerung der Haftkräfte bei beiden Lotmaterialien in verschiedenen Maßen.

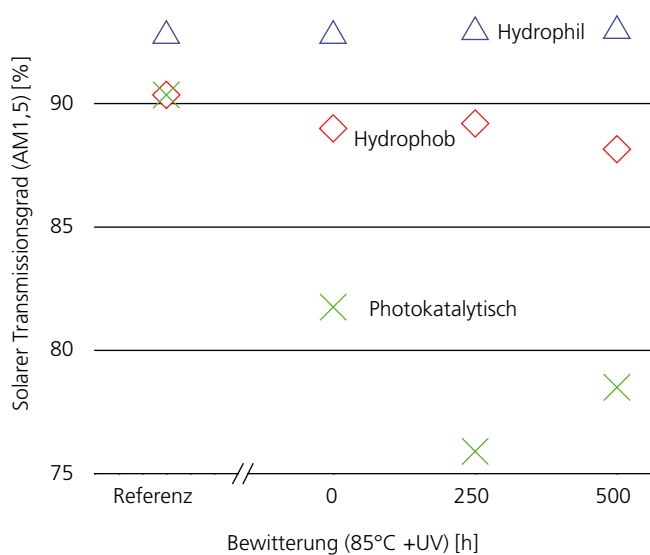
und Eindringtiefe des Zinns in die poröse Matrix die Haftung der Metallisierung auf dem Wafer sinkt. Dieses Verhalten variiert für verschiedene Lotlegierungen und Metallisierungen. Die wesentlichen Parameter dabei sind die Porosität der gefeuerten Metallisierung und die Lotlegierungszusammensetzung. Unsere Ergebnisse erlauben eine Optimierung der Lötstellen durch die Materialauswahl, den Aufbau der Komponenten und die Prozessparameter.



## PRÜFUNG VON ANTI-SOILING SCHICHTEN AUF VERGLASUNGSMATERIALIEN

Untersuchungen des Fraunhofer ISE an einer stark verschmutzten Photovoltaikanlage auf Gran Canaria haben im Jahr 2010 Rückgänge des Ertrages von bis zu 80% festgestellt. Anti-Soiling Beschichtungen sollen Verschmutzungen verhindern und den Ertrag von solarthermischen und PV-Anlagen sicherstellen. Dabei müssen die Beschichtungen beständig gegenüber den lokalen Witterungseinflüssen sein. Zudem darf die Beschichtung keinen negativen Einfluss auf die solare Transmission haben. Beide Forderungen können viele Systeme am Markt momentan noch nicht erfüllen.

Thomas Kaltenbach, Christian Schill, Karolina Slamova, Harry Wirth



3 Solarer Transmissionsgrad der drei untersuchten Beschichtungen. Referenz: unbeschmutzte Probe, dazu beschmutzt/ergereinigte Probe jeweils nach 0h und nach Alterungsstufen 250h und 500h bei 85°C und UV-Strahlung.

- 1 Auf Gran Canaria exponierte Glasprobe mit hoher Verschmutzung.
- 2 Glasprobe unbeschmutzt und mit appliziertem Arizona-Staub.

Die in Wüsten vorherrschenden Verhältnisse begünstigen das Soiling der dortigen Solaranlagen. Diese Regionen sind jedoch für die Nutzung der Solarenergie besonders wegen der hohen Einstrahlungssummen gefragt.

Das Fraunhofer ISE betreibt sowohl in der Negev-Wüste als auch auf den Kanarischen Inseln (Abb. 1) in Kooperation mit Instituten vor Ort Freibewitterungsteststände, auf denen unter anderem auch Soiling-Effekte im Rahmen des Verbundprojekts SpeedColl untersucht werden. SpeedColl wird unterstützt durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) sowie durch Industriebeteiligung ([www.speedcoll.de](http://www.speedcoll.de)).

Am Fraunhofer ISE wurde im Rahmen einer Marktstudie ein Überblick über die angebotenen Beschichtungen erstellt. Ein Verfahren, welches die reproduzierbare Beschmutzung der Prüflinge mit Normstäuben (Abb. 2) erlaubt, wurde entwickelt und an ausgewählten Proben getestet.

Zur Prüfung der Stabilität der Schichten wurden die Prüflinge verschiedenen beschleunigten Alterungsprüfungen unterzogen (Temperatur bei 85 °C, mit und ohne UV-Strahlung). Eine mögliche Degradation der schmutzabweisenden Eigenschaften wurde mittels Transmissions- und Kontaktwinkelmessungen sowie durch den entwickelten Beschmutzungstest untersucht.

Mit diesem Testverfahren wurde nachgewiesen, dass die solare Transmission (Abb. 3) durch keine der untersuchten Beschichtungen negativ beeinflusst wird. Die Beschichtungen verlieren jedoch zum Teil ihre schmutzabweisende Wirkung schon nach 250 Stunden UV-Bestrahlung und erscheinen damit für solarthermische Anlagen nicht geeignet.





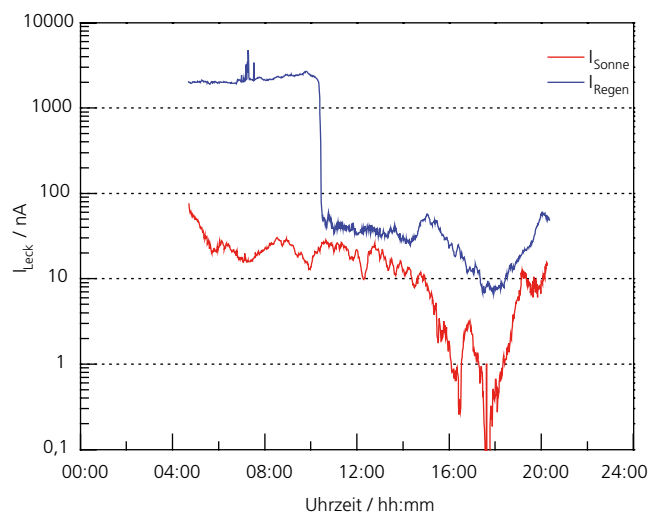
## POTENTIALINDUZIESTE DEGRADATION IM INDOOR- UND OUTDOORVERSUCH

In den letzten Jahren beschäftigt die PV-Industrie in zunehmendem Maße ein Phänomen, das einen schlechenden, 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 hinsichtlich Verschaltung oder Wechselrichter im Systemaufbau keine Einschränkungen hinnehmen zu müssen, sollte das Problem der PID bereits durch Stabilisierungsmaßnahmen auf Zell- und Modulebene gelöst werden. Um deren Wirksamkeit schnell überprüfen zu können, wird im Rahmen eines BMBF-geförderten Projekts sowohl an Schnelltests als auch an verifizierenden Langzeittests in der Freibewitterung gearbeitet.

Stephan Hoffmann, Michael Köhl, Harry Wirth

Mit Schnelltests auf Basis des IEC-Normentwurfs 62804 können wir die Beständigkeit eines PV-Moduls gegen PID testen. Mittels Potentialdifferenz zwischen Erdung und Zellen mithilfe einer geerdeten leitfähigen Folie auf der Verglasung bei trockenem Raumklima oder in Klimakammern bei definierter Temperatur und hoher, definierter Luftfeuchtigkeit erlauben unsere Untersuchungen der Abhängigkeiten von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in der Umgebung des Moduls die Modellierung des Leckstroms. Wir konnten zeigen, dass bei verschiedenen Varianten der Erdung dieselbe exponentielle Temperaturabhängigkeit des Leckstroms und damit auch dieselbe Aktivierungsenergie auftritt. Allerdings ist der Leckstrom bei hoher Feuchte (85%) eine Größenordnung höher als in trockener Luft und wiederum eine weitere Größenordnung höher bei ganzflächiger Erdung der Verglasung mittels Aluminiumfolie. Die Feuchte stellt erst ab Werten von ca. 60% eine hinreichende, reproduzierbare Erdung sicher, weil dann eine Perkolations des Feuchtefilms auf dem Glas auftritt.

1 Teststand auf Gran Canaria zur Ermittlung klimatischer Einflüsse auf die Potentialinduzierte Degradation. Die Leistungs- und Leckstromdaten der Module sowie die Klimadaten werden permanent gemessen.



2 Vergleich des Leckstroms an einem Tag mit Regenereignis (bis ca. 10:30 Uhr) und an einem trockenen Tag. Durch den Wasserfilm auf dem Modul fließt ein um zwei Größenordnungen höherer Leckstrom. Im weiteren Tagesverlauf (nach Abtrocknung) zeigen die gemessenen Leckströme ein ähnliches Niveau.

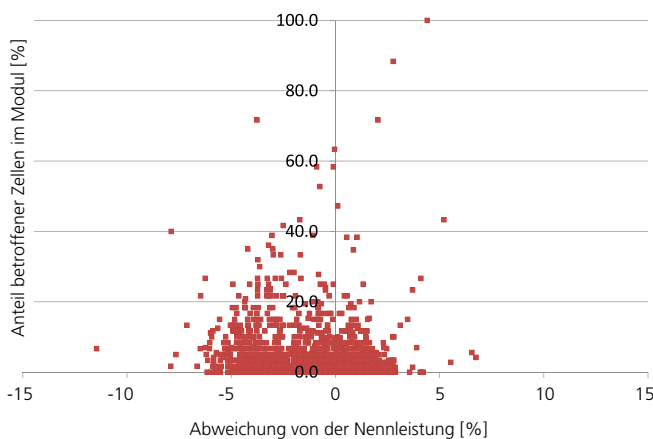
Neben den Labor-Untersuchungen wird das Langzeitverhalten der Module durch Exposition an den klimatisch stark unterschiedlichen Freibewitterungsstandorten in Freiburg und auf Gran Canaria (Abb. 1) untersucht. Während für den Standort Freiburg Regenereignisse durch ihre hohe elektrische Leitfähigkeit als hohe Gefährdung identifiziert wurden (Abb. 2), bildete sich auf Gran Canaria durch die hohe Salz- und Staubbeltung eine vollflächige Schmutzschicht auf den Modulen, die zu einer permanent hohen Leitfähigkeit auf der Verglasung und damit zu hohen Leckströmen führt.



## ELEKTROLUMINESZENZ-TESTS AN PV-MODULEN

Elektrolumineszenzmessungen werden am Fraunhofer ISE seit 2007 zur Untersuchung und Charakterisierung von PV-Modulen eingesetzt. Mithilfe dieser Messungen können Fehler oder Auffälligkeiten, die mit dem bloßen Auge nicht erkennbar sind, sichtbar gemacht werden. Deshalb spielen Elektrolumineszenzmessungen eine zunehmend wichtige Rolle im Rahmen der Qualitätssicherung für PV-Module. Nicht immer ist jedoch klar, welche Schlüsse aus den Aufnahmen gezogen werden können. Die steigenden Anforderungen und Fragestellungen unserer Kunden erfordern eine fundierte Bewertung der Auffälligkeiten besonders im Hinblick auf die Langzeitstabilität.

**Daniela Dirnberger**, Boris Farnung, Stephan Hoffmann, Klaus Kiefer, Carlos Moschella, Frank Neuberger, **Sandor Stecklum**, Daniel Philipp, Karl-Anders Weiß, Harry Wirth



3 Anteil der gerissenen Zellen pro Modul aufgetragen über die Abweichung der gemessenen Modulleistung von der Nennleistung.

- 1 EL-Aufnahme eines neuwertigen polykristallinen Moduls.
- 2 Die EL-Aufnahme des gleichen Moduls nach einer Temperaturwechselprüfung zeigt inaktive Zellbereiche (rot).

Elektrolumineszenz-Tests (EL-Tests) spielen von der Zellentwicklung bis hin zur Qualitätssicherung für handelsübliche PV-Module eine wichtige Rolle. Der Test gibt Aufschluss über Fehler oder Besonderheiten in den Solarzellen. Typische Auffälligkeiten sind Zellrisse, inaktive Zellbereiche oder Kontaktflächenfehler.

Bei etwa 4750 Modulen wurde bisher zusätzlich zur Leistungsmessung der EL-Test durchgeführt, in beiden Fällen ohne vorherige belastende Prüfungen. Die detaillierte Analyse von 1830 Modulen ergab, dass 62 Prozent der Module Zellrisse aufweisen. Bei einem Teil der betroffenen Module (12 Prozent der gesamten Prüfcharge) wurden inaktive Zellbereiche entdeckt. Eine Korrelation zwischen dem Anteil der gerissenen Zellen und Abweichungen von der Nennleistung konnte nicht festgestellt werden (Abb. 3).

Über zusätzliche Belastungsprüfungen wird ermittelt, welche Schadensbilder eine Zunahme der Risse und damit Leistungseinbußen im späteren Betrieb erwarten lassen. In Abb. 1 sind mehrere Risse zu erkennen, die nach einer Lastprüfung zur Deaktivierung von Zellbereichen geführt haben (Abb. 2). Das Modul zeigte nach der Lastprüfung einen Leistungsverlust von 3,9%.

Nicht alle Auffälligkeiten sind bezüglich der Langzeitstabilität der Leistung eines PV-Moduls kritisch zu bewerten. Ein wichtiger Aspekt bei unseren Untersuchungen ist deshalb die Weiterentwicklung vorhandener Fehler im Betrieb der Module und deren Auswirkungen auf die Lebensdauer und den Ertrag.



## »ENERGY RATING« – NEUE BEWERTUNGSKRITERIEN FÜR PV-MODULE

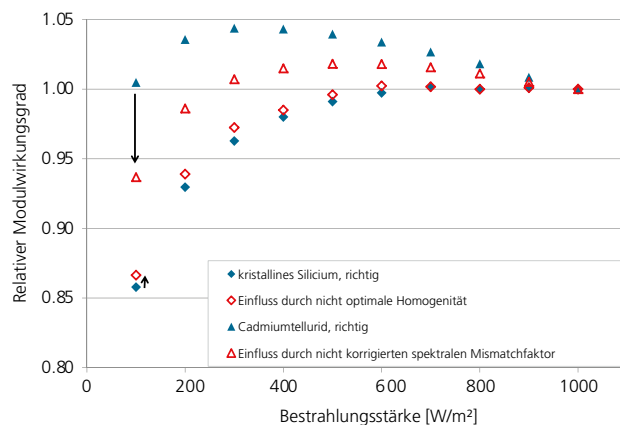
Bei fallenden Investitionskosten wird die Rendite eines PV-Kraftwerkes mehr und mehr durch den Ertrag über die gesamte Laufzeit bestimmt. Das „Energy Rating“ betrachtet nicht nur die Leistung der Solarmodule unter STC Bedingungen sondern, liefert eine ganzheitliche Leistungsbewertung. Das Schwachlichtverhalten und die Temperaturabhängigkeit sind die zwei wichtigsten Einflussgrößen auf den Jahresertrag. Beide Charakteristika können im Callab PV Modules präzise gemessen und für die Prognosemodelle verwendet werden. Um die Unsicherheiten bei der Messung dieser Größen zu minimieren, haben wir neue Verfahren entwickelt und die Messtechnik optimiert.

**Daniela Dirnberger**, Klaus Kiefer, Ulli Kräling, Björn Müller, Frank Neuberger, Christian Reise, Harry Wirth

Für präzise Ertragsprognosen sind hochwertige Wetterdaten für den geplanten Standort und sämtliche Eigenschaften der Komponenten erforderlich. Zu der Abhängigkeit des Wirkungsgrads bzw. der Leistung von der solaren Einstrahlung gibt es im Datenblatt der Hersteller nicht immer ausreichend Informationen. Werden die Größen mit den von uns entwickelten Verfahren und einem optimierten Messsystem gemessen, liegen die Messunsicherheiten für sämtliche Messpunkte bei  $\pm 0.5\%$ . Bei der von uns durchgeführten Analyse für drei Standorte in Norddeutschland, Süddeutschland und Südspanien ergeben sich Beiträge zu Gesamtunsicherheit für den prognostizierten Ertrag von maximal  $\pm 1\%$  für Module mit kristallinen Silicium-Zellen und  $\pm 2\%$  für Cadmiumtellurid-Module. Bei der Verwendung herkömmlicher Verfahren oder Datenblattangaben der Hersteller können leicht zusätzliche Abweichungen von 0.5 bis 2.5% entstehen.

Für das Energy Rating und eine präzise Ertragsprognose ist eine präzise Modulcharakterisierung daher unumgänglich.

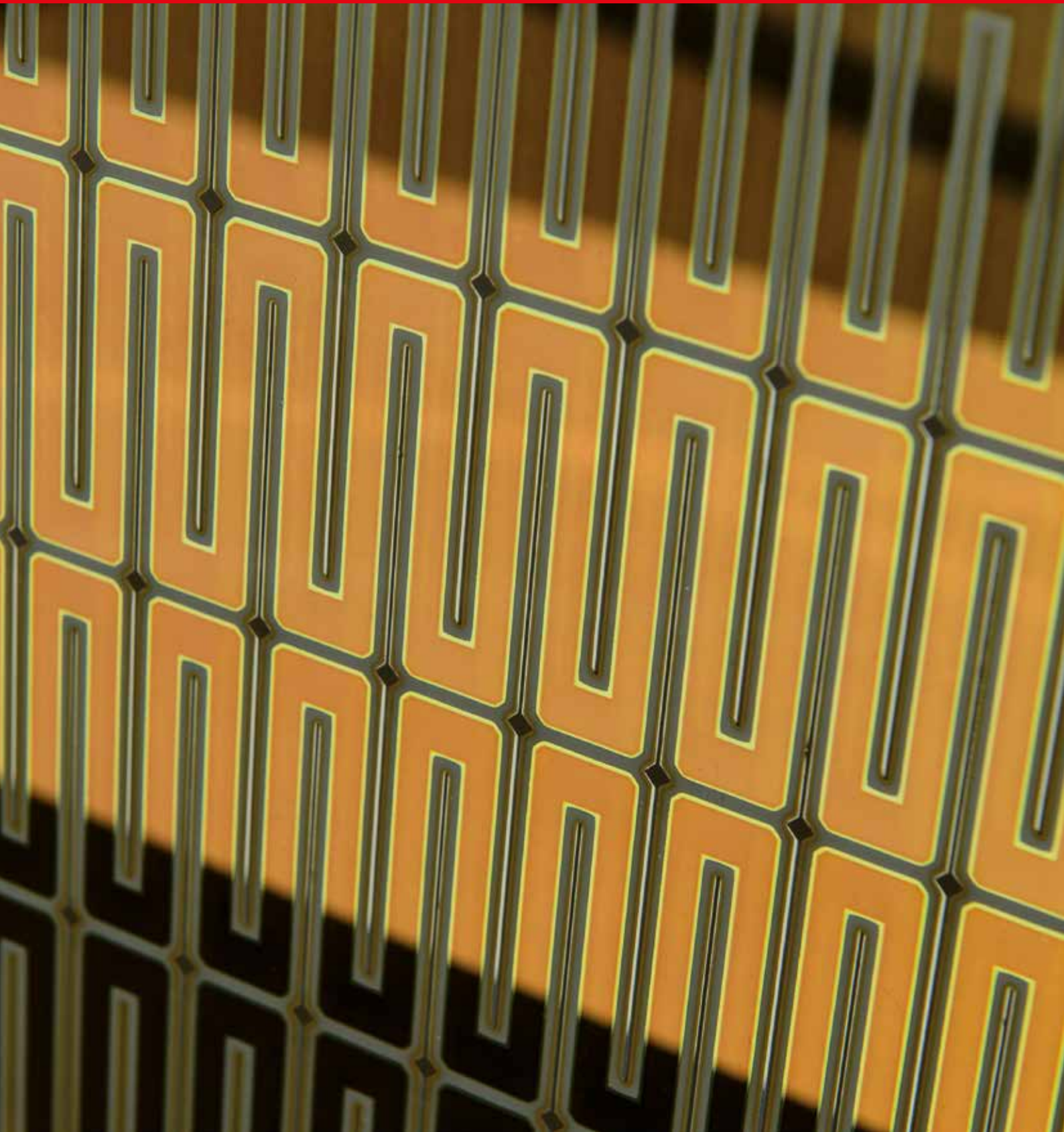
1 PV-Kraftwerk mit einer nominalen Leistung von 10 MW.



2 Bei nicht optimierten Messsystemen und -prozeduren können erhebliche Fehler (rot) in der gemessenen Bestrahlungsstärkeabhängigkeit enthalten sein.



# STROM AUS SONNENLICHT





# ALTERNATIVE PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIEN

In Ergänzung zur Silicium-Photovoltaik erstreckt sich unsere Solarzellenforschung und -entwicklung auf weitere Photovoltaik-Technologien: III-V-basierende Halbleiter, Farbstoffsolarzellen und organische Solarzellen, die Konzentratortechnologie sowie Nanomaterialien und neuartige Konzepte für die Photovoltaik.

## III-V-basierende Halbleiter

Mehrfachsolarzellen auf Basis von III-V Halbleitern wie Galliumindiumphosphid, Aluminiumgalliumarsenid, Galliumarsenid oder Galliumindiumnitridarsenid erzielen heute die höchsten Wirkungsgrade aller Solarzellen von bis zu 44 %. Dreifachsolarzellen aus GaInP/GaInAs/Ge werden erfolgreich im Weltraum und auf der Erde im Zusammenspiel mit der optischen Konzentration des Sonnenlichts eingesetzt. 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 verwenden 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

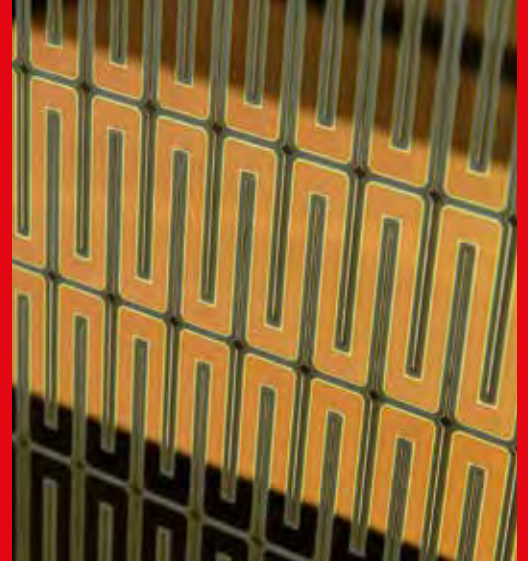
Möglichkeit, gestalterische Aspekte umzusetzen, wurde in Prototypen gezeigt. Die Beständigkeit der Module wird im Labor und unter Außenbewitterung getestet. Prototypen von Farbstoffsolarmodulen in einer kommerziell interessanten Größe (60 cm x 100 cm) auf ungeteilten Substraten wurden bereits hergestellt. 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 Konzentrationsfaktoren <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 kommerziell als Concentrix™ Modul produziert wird. 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. Wir konnten eine Quantenpunktmembranzelle herstellen, die weltweit erstmals die Anwendbarkeit dieses Nanomaterials als Solarzelle einwandfrei bestätigt. Weitere Konzepte sind u. a. Fluoreszenzkonzentratoren, thermophotovoltaische Systeme und Solarzellen für die kabellose Energieübertragung mit Laserstrahlen.

*Farbstoffsolarmodule stehen kurz vor der breiten Einführung in den Markt. Da sie sowohl transparent als auch opak gestaltet werden können, eröffnen sich vor allem im Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik interessante Anwendungsmöglichkeiten. 2012 haben wir ein 60 cm x 100 cm großes Modul mit langzeitstabiler Glaslotversiegelung und interner serieller Verschaltung im Siebdruckprozess reproduzierbar hergestellt (s. S.106). Testmodule werden zu DEMO-Zwecken in eine Laborfassade integriert.*

**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

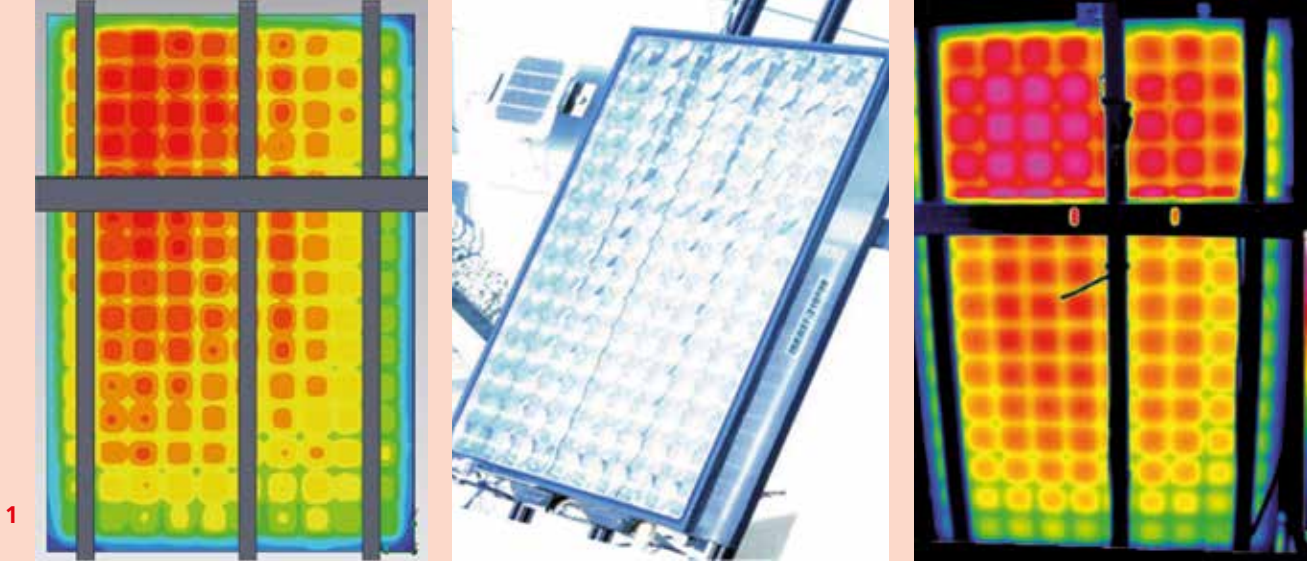
---

**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

---

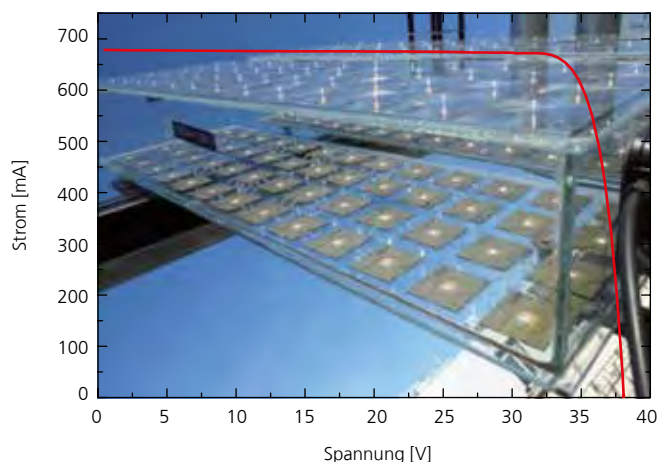


## OPTIMIERUNG PUNKTFOKUSSIERENDER KONZENTRATORMODULE

In der Konzentratorphotovoltaik werden Linsenoptiken eingesetzt, welche die Strahlung auf sehr kleine Solarzellen fokussieren. Seit vielen Jahren entwickeln und optimieren wir punktfokussierende Konzentratormodule. Unser FLATCON®-Modul erreicht in Außenmessungen einen Wirkungsgrad von 32,1 %. Für die weitere Optimierung dieser Module ist das thermische Verhalten wichtiges Gestaltungsmerkmal. Wir nutzen Finite Elemente Simulation sowie Computational Fluid Dynamic Modelle, um Module optimal zu gestalten. Die Simulationsmodelle validieren wir mittels Experimenten.

Armin Bösch, Tobias Dörsam, Harald Kraus, Marc Steiner, Maïke Wiesenfarth, Andreas Bett

Die Konzentration von Solarstrahlung bedeutet einen hohen Energieeintrag auf die Solarzelle. Durch den Einsatz von hocheffizienten Mehrfachsolarzellen wird mehr als 30 %



2 I-V Kennlinie und Foto des FLATCON®-Moduls. Die Messung wurde am Außenteststand in Freiburg am 18.8.2012 aufgenommen. Der Wirkungsgrad des Moduls mit einer Fläche von 832 cm<sup>2</sup> betrug 32,1 %.

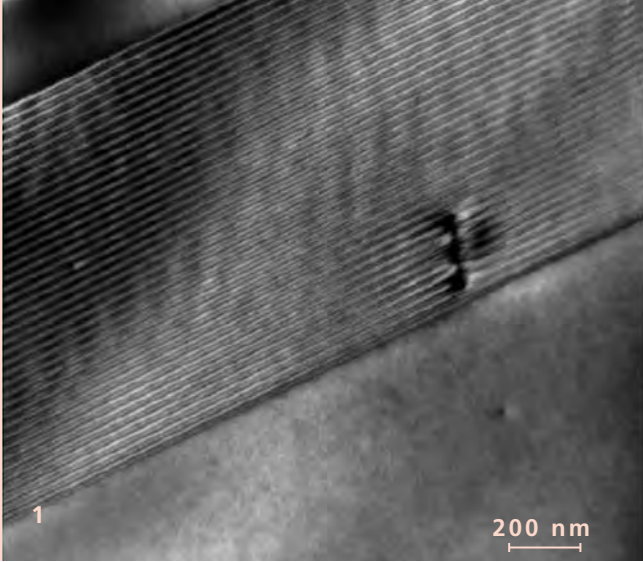
1 Die orts aufgelöste Temperaturverteilung in einem linsenbasierten Konzentratormodul ist von großem Interesse. In der Mitte ist das untersuchte Konzentratormodul abgebildet, links die simulierte und rechts die gemessene Temperaturverteilung auf der Modulrückseite dargestellt. Die Temperaturverteilung stimmt in beiden Fällen sehr gut überein.

der Sonnenenergie in elektrische Energie umgewandelt. Wir haben unsere FLATCON®-Module mit von AZUR Space Solar Power industriell gefertigten Solarzellen bestückt und Wirkungsgrade von 32,1 % erreicht (Abb. 2). Die restliche Energie wird hauptsächlich in thermische Energie umgewandelt und an die Umgebung abgegeben. Um geringe Solarzellentemperaturen zu erreichen, muss dieser Wärmeübergang sorgfältig ausgelegt werden. Wir nutzen Simulationen zur Untersuchung der thermomechanischen Beanspruchung und Temperaturverteilung. Diese überprüfen wir dann mit experimentellen Untersuchungen unter realen Außenbedingungen. Ein Beispiel ist in Abb. 1 gezeigt. Die mittels Computational Fluid Dynamic (CFD) Modelle simulierte Temperaturverteilung auf der Modulrückseite entspricht der mit einer Infrarotkamera gemessenen Temperaturverteilung.

Eine weitere Möglichkeit des thermischen Managements ist die Nutzung der thermischen Energie. Dies ist der effizienteste Weg, das Sonnenlicht zu nutzen. Die thermische Energie wird in Wärmemedien gespeichert und als Prozesswärme zur Verfügung gestellt. Auch diese sogenannten CPVT Systeme (engl. »Concentrator Photovoltaic and Thermal«) untersuchen wir am Fraunhofer ISE, wobei einer unserer Schwerpunkte die Entwicklung des Strahlungsempfängers und die Optimierung des Zusammenspiels von Optik und Receiver ist.

Unserer Arbeiten werden vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) und durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) unterstützt.





## MULTI-QUANTENWELL SOLARZELLEN FÜR DEN WELTRAUM

Der Industriestandard für Solarzellen zum Einsatz in Satelliten im Weltraum sind III-V basierende Dreifach-solarzellen. Die Schichtstruktur wird aus unterschiedlichen Elementen der Gruppen III und V des Periodensystems hergestellt. Dies garantiert einen hohen Wirkungsgrad von über 30 % bei extraterrestrischen Einstrahlungsbedingungen. Zusammen mit unserem Industriepartner AZUR SPACE Solar Power haben wir im Rahmen des Projekts »Nanospace II« untersucht, ob eine neue Solarzellenstruktur auf Basis von Quantenwells die bisherigen Wirkungsgrade verbessern kann.

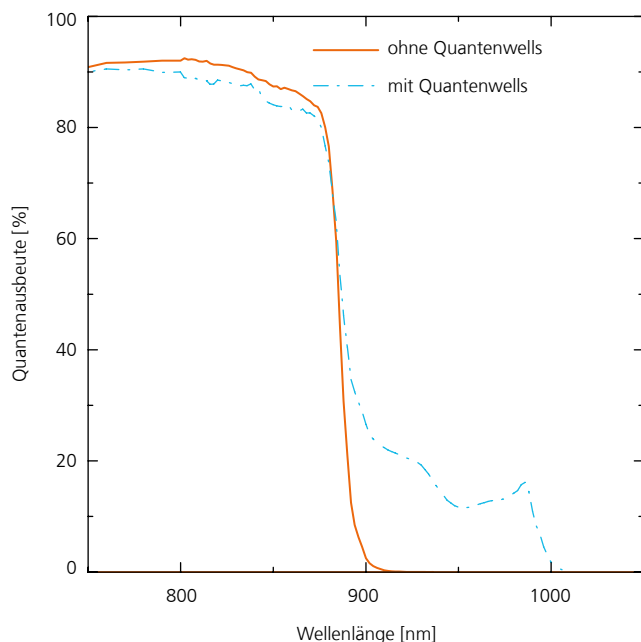
Stephanie Essig, **Peter Fuss-Kailuweit**, David Lackner, Gerald Siefer, Frank Dimroth, Andreas Bett

Heutige Weltraumsolarzellen bestehen aus drei Teilsolarzellen, von der jede einen anderen Spektralbereich des Sonnenlichts nutzt. Kosmische, hochenergetische Teilchenstrahlung erzeugt nun Defekte in der Kristallstruktur, welche die Effizienz der Solarzelle kontinuierlich mindern. Die strahlungsinduzierte Schädigung müssen wir daher bereits beim Design der Solarzelle berücksichtigen.

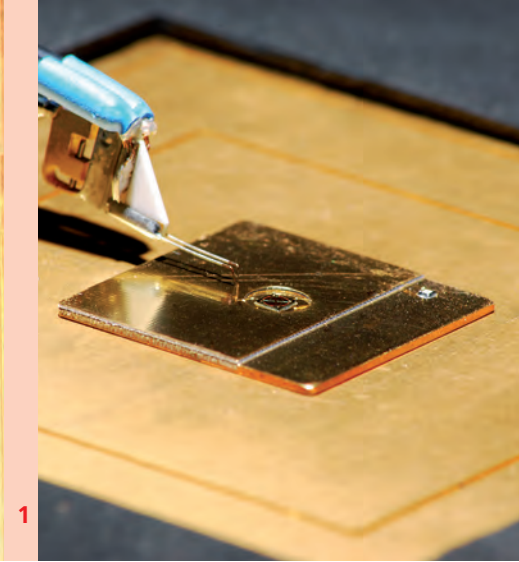
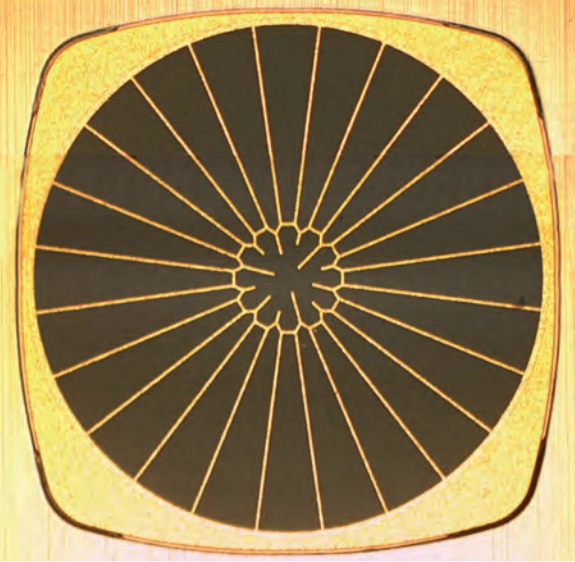
In einer Quantenwellsolarzelle wird zwischen die p-dotierte Basis und den n-dotierten Emitter eine Vielfachschicht aus zwei alternierend abgeschiedenen Materialien eingefügt. Die Schichtdicke beträgt dabei nur wenige Atomlagen, weshalb wir quantenmechanische Effekte beobachten. Sie wird daher Quantenwellstapel genannt und von uns so konzipiert, dass im Vergleich zur herkömmlichen Solarzelle zusätzliches Licht bei längeren Wellenlängen absorbiert wird (Abb. 1). So können wir die Stromanpassung der einzelnen Teilsolarzellen besser aufeinander abstimmen und dem Schädigungseffekt durch Teilchenstrahlung im Weltraum entgegenwirken.

Das Projekt wurde von der European Space Agency finanziert.

1 Elektronenmikroskopischer Schnitt durch eine Quantenwellsolarzelle. Deutlich sind die abwechselnden Schichten der Quantenwell-region zu sehen, die von den übrigen Solarzellschichten umgeben ist.



2 Anteil des Lichts, das von je einer Teilsolarzelle mit und ohne Quantenwells bei verschiedenen Wellenlängen in elektrischen Strom umgewandelt wird (Quantenausbeute). Deutlich ist zu sehen, wie die Quantenwellzelle noch Wellenlängenbereiche des Lichts ausnutzt, die von der gewöhnlichen Zelle nicht mehr absorbiert werden.



## ENTWICKLUNG UND CHARAKTERISIERUNG VON KONZENTRATORSOLARZELLEN

**Mehrfachsolarzellen aus III-V Verbindungshalbleitern erzielen heute die höchsten Wirkungsgrade für die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom. Wir arbeiten seit mehr als 15 Jahren an dieser Technologie und 2009 haben wir einen Wirkungsgrad von 41,1 % unter konzentriertem Licht erreicht. Dabei wurde eine Solarzelle mit drei pn-Übergängen eingesetzt. In einem von der Europäischen Union geförderten Forschungsvorhaben arbeiten wir heute gemeinsam mit Projektpartnern in Europa und Japan an der Herstellung und präzisen Vermessung der nächsten Generation von Mehrfachsolarzellen mit vier pn-Übergängen.**

**Frank Dimroth**, Stephanie Essig, Elvira Fehrenbacher, Stephan Heckelmann, Ranke Koch, David Lackner, Karin Mayer, Markus Niemeyer, Eduard Oliva, Inessa Semke, Gerald Siefer, Michael Schachtner, Manuela Scheer, Katrin Wagner, Alexander Wekkeli, Andreas Bett

In III-V Mehrfachsolarzellen werden mehrere pn-Übergänge mit Empfindlichkeit im blauen bis infraroten Spektralbereich übereinander gestapelt. Diese Solarzellen werden heute im Weltraum und in photovoltaischen Konzentratorsystemen auf der Erde eingesetzt. Der Industriestandard besteht aus einer Dreifachsolarzelle mit drei separaten pn-Übergängen in den Materialien GaInP, GaAs und Ge.

Die nächste Generation dieser Hocheffizienzzellen soll aus vier oder fünf Teilzellen bestehen, um so die Effizienz der Energieumwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom noch weiter zu erhöhen. Gemeinsam mit unseren Projektpartnern arbeiten wir an diesen neuen Solarzellenkonzepten. Hierbei wird ein neues Material mit einer Bandlücke von 1,0 eV in die heutige Struktur eingebaut. Wir verwenden gitterfehlange-

1 Metallfinger einer Konzentratorsolarzelle mit 1 mm Durchmesser (links) und Kalibrierung der Zelle unter AM1.5d Normbedingungen (rechts).

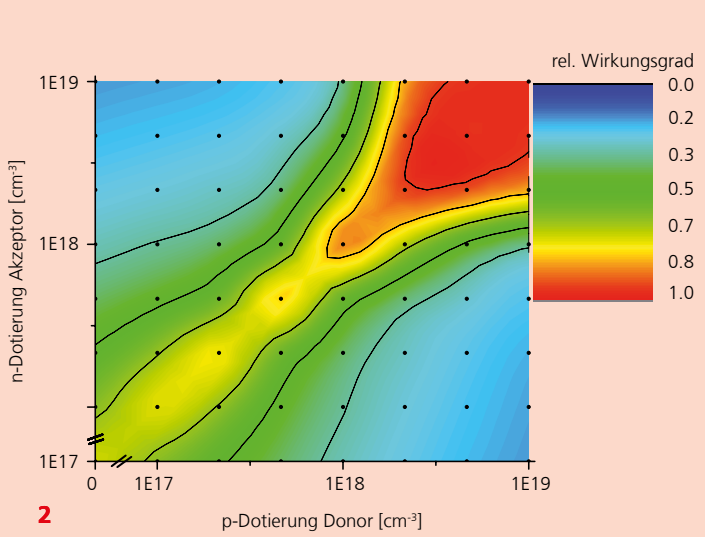
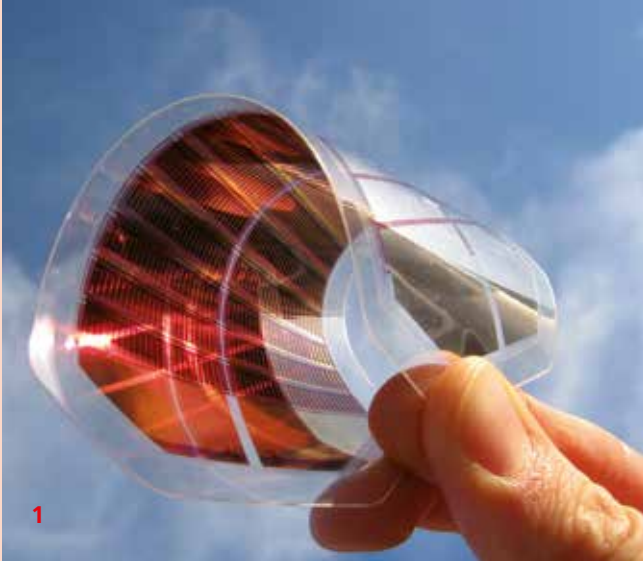
2 XSIM Sonnensimulator zur exakten Vermessung von Solarzellen mit bis zu sechs pn-Übergängen.

passte Schichten aus  $\text{Ga}_{1-x}\text{In}_x\text{As}$ , wobei die Bandlückenenergie über die Konzentration an Indium im Kristall eingestellt wird. Eine Herausforderung ist der Wechsel der atomaren Abstände in diesen Kristallschichten. Hierdurch können Versetzungen entstehen, die sich negativ auf die Bauelementeigenschaften auswirken. Einer unserer Schwerpunkte ist die Entwicklung von Übergangsschichten zwischen den Materialien. Weiterhin optimieren wir die Materialqualität anhand von Teststrukturen und Solarzellen.

Die Charakterisierung von Vierfachsolarzellen ist ein weiteres Entwicklungsfeld. Aufgrund der seriellen Verschaltung der Teilzellen muss das Spektrum des Sonnensimulators so eingestellt werden, dass unter den Messbedingungen identische Photoströme generiert werden, wie unter AM1.5d Normbedingungen. Hierzu werden von uns konzipierte neue Sonnensimulatoren eingesetzt (Abb. 2), die es erlauben, das Spektrum in den verschiedenen Wellenlängenbereichen separat einzustellen. Wir nehmen auch an internationalen Messvergleichen teil, bei denen wir zeigen konnten, dass Messungen am Fraunhofer ISE und bei AIST (Japan) eine gute Übereinstimmung aufweisen.

Die Forschungsarbeiten werden durch die Europäische Union im Rahmen des Projekts »NGCPV« gefördert.

[www.III-V.de](http://www.III-V.de)



## ZWEIDIMENSIONALE MODELLIERUNG ORGANISCHER SOLARZELLEN

Anders als bei herkömmlichen Solarzellen besteht die photoaktive Schicht organischer Solarzellen aus zwei verschiedenen Materialien, einer Donor- und einer Akzeptorphase, die beide zur Generation von Ladungsträgerpaaren beitragen. Die Löcher werden im Donor transportiert, die Elektronen im Akzeptor. Die theoretische Beschreibung organischer Solarzellen wird üblicherweise mit 1-dimensionalen Modellen vorgenommen, die den 2-Phasencharakter der photoaktiven Schicht nicht wiedergeben. Aus diesem Grund haben wir ein 2-dimensionales Modell entwickelt, das beide Komponenten der photoaktiven Schicht explizit berücksichtigt. Dieses wurde erfolgreich auf die Bestimmung der Auswirkungen einer Dotierung beider Komponenten angewendet.

Martin Andreas Fischer, Felix Stelzl, Uli Würfel, Birger Zimmermann, Stefan Glunz

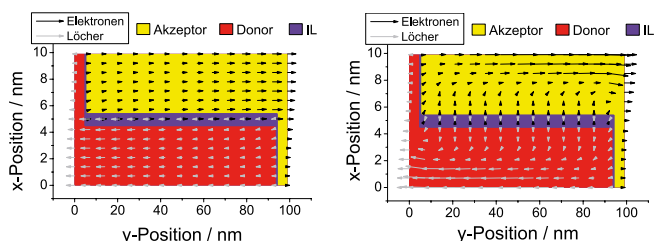
In bisherigen Simulationen wurde das Modell des effektiven Halbleiters verwendet, dessen Elektronen (Löcher)-Transport-Niveau dem des Akzeptors (Donors) entspricht. Damit können u. a. die Auswirkungen der Ladungsträgermobilitäten, Selektivität der Kontakte oder einer p- oder n-Dotierung der photoaktiven Schicht gut abgebildet werden. Die Untersuchung des Effekts einer Dotierung beider Phasen ist mit diesem Modell aber nicht möglich, da Kompensation auftritt.

Unser erweitertes 2-D Modell ermöglicht dies, da hier beide Phasen explizit berücksichtigt werden. Abb. 2 zeigt, dass die Effizienz dadurch erheblich gesteigert werden könnte. Grund hierfür ist, dass es sich bei der organischen Solarzelle um ein reines Majoritätsladungsträgerbauteil handelt, da sich die Elektronen in der Akzeptorphase und die Löcher in der Donorphase befinden. Die Generation und Rekombination findet ausschließlich an der Grenzfläche der beiden Phasen statt. Durch die verschiedene Dotierung kommt es zur Ausbildung

- 1 ITO-freies organisches Solarzellenmodul auf flexiblem Substrat.
- 2 Wirkungsgrad (relativ) einer organischen Donor/Akzeptor Solarzelle als Funktion der p-Dotierung der Donorphase und der n-Dotierung der Akzeptorphase.

einer Verarmungszone mit entsprechender Bandverbiegung. Die Ladungsträgerkonzentration ist daher an der Grenzfläche am niedrigsten und erreicht in der Mitte der Phasen ihren jeweils höchsten Wert. Dies ermöglicht einen wesentlich effektiveren Transport zu den Kontakten, was sich positiv auf den Füllfaktor und damit auf den Wirkungsgrad auswirkt. Abb. 3 zeigt, dass die Ladungsträger im undotierten Fall relativ homogen verteilt zu den Elektroden transportiert werden, wohingegen für stark dotierte Phasen sich die Ladungsträger zunächst senkrecht zur Grenzfläche in die Mitte der jeweiligen Phasen bewegen, bevor sie in den Bereichen höchster Leitfähigkeit zu den Elektroden transportiert werden.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und von der Deutschen Forschungsgemeinschaft unterstützt.



- 3 Ortsabhängigkeit der Stromdichte im Kurzschluss für den Fall der undotierten Phasen (links) und für den Fall eines stark n-dotierten Akzeptors und eines stark p-dotierten Donors (rechts). IL steht für Grenzflächenschicht (Interfacial Layer), in der die Ladungsträger rekombinieren.





## PRODUKTENTWICKLUNG VON FARBSTOFFSOLARMODULEN

Farbstoffsolarzellen stehen kurz vor der breiten Einführung in den Markt. Bereits verwirklicht werden Anwendungen in Lifestyle-Produkten. Da Farbstoffsolarzellen sowohl transparent als auch opak gestaltet werden können, stellen sie darüber hinaus eine interessante Applikation für die gebäudeintegrierte Photovoltaik dar. Am Fraunhofer ISE wird an der Entwicklung von photovoltaisch aktivem Architekturglas gearbeitet. Die 60 cm x 100 cm großen Module mit langzeitstabiler Glaslotversiegelung und interner serieller Verschaltung können nun reproduzierbar hergestellt werden.

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

Anders als bei herkömmlichen Solarzellen wandelt bei Farbstoffsolarzellen ein organischer Farbstoff Licht in elektrische Energie um. Die Module werden mit einfachem Siebdruck hergestellt und mit Glaslot in einem thermischen Prozess versiegelt. Das Einfärben der aktiven Schicht mit dem Farbstoff und die Befüllung des Moduls durch Elektrolyt wird mit am Fraunhofer ISE entwickelten Maschinen-Prototypen durchgeführt, die sich im laufenden Optimierungsprozess befinden. Die Herstellung von Farbstoffsolarmodulen kann in bestehende Prozesse zur Veredelung von Flachglas integriert werden.

Der großflächige Siebdruckprozess konnte in kleinen Prototypen-Produktionen bei Projektpartnern reproduziert werden. Darüber hinaus konnten wir zeigen, dass frühere Resultate von

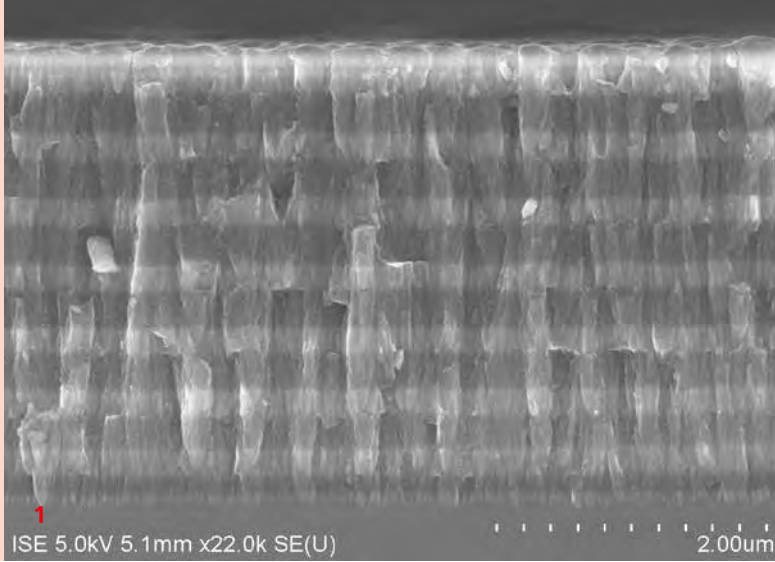
1 *Mobiler Showroom für großflächige Farbstoffsolarmodule zur Präsentation auf Messen und Konferenzen.*

10 cm x 10 cm großen Modulen auch für die aufskalierten, 60 cm x 100 cm großen Module erreichbar sind. Hierbei konnte bereits ein Wirkungsgrad von 6,6 % auf aktiver Fläche erzielt werden. Wichtig für die Langzeitstabilität von Farbstoffsolarzellen ist die Elektrolytentwicklung. Mit Projektpartnern haben wir in standardisierten Testzellen eine breite Palette von Materialien mit PV-üblichen Standardtestverfahren auf ihre Stabilität getestet. Vielversprechende Materialien werden nun in den großflächigen Modulen eingesetzt.

Der Schwerpunkt unserer derzeitigen Arbeiten liegt neben der Materialentwicklung in der Optimierung des Modulkonzepts und an der weiteren Umsetzung der Prozessschritte in eine industrietaugliche Umgebung. Hierfür arbeiten wir gezielt mit Unternehmen aus den Bereichen zusammen, die Interesse an Herstellungs- und Vermarktungsk Kooperationen für Farbstoffsolarzellen haben.

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





# NANO-STRUKTUREN FÜR EIN EFFIZIENTES PHOTONENMANAGEMENT

**Photonenmanagement bezeichnet Techniken, die den Weg des Lichts und dessen spektrale Zusammensetzung beeinflussen, um so prinzipielle Beschränkungen des Wirkungsgrads herkömmlicher Solarzellen zu überwinden. Wichtige Bausteine für Systeme zum Photonenmanagement sind spektral selektiv reflektierende Strukturen. Diese lassen sich z. B. zur Effizienzsteigerung der Hochkonversion, zur Verbesserung der Lichtsammlung in Fluoreszenzkonzentratoren oder direkt zur Absorptionserhöhung in Solarzellen einsetzen.**

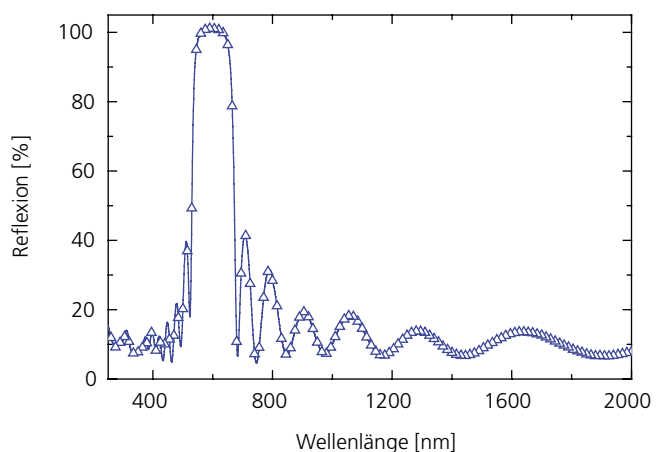
Benedikt Bläsi, Johannes Eisenlohr, Stefan Fischer, Judith Frank, Benjamin Fröhlich, Johannes Gutmann, **Jan Christoph Goldschmidt**, Martin Hermle, Barbara Herter, Stefan Janz, Janina Löffler, Janina Posdziech, Tim Rist, Heiko Steinkemper, Sebastian Wolf, Stefan Glunz

Je nach Einsatzzweck stellen wir selektiv reflektierende Strukturen aus unterschiedlichen Materialsystemen her. Für das nahe Infrarot eignen sich Multischichtsysteme aus unterschiedlichen Siliciumcarbid-Verbindungen (SiC) mit jeweils unterschiedlichen Brechungsindizes (Abb. 1). Diese lassen sich mit Plasma-Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD) abscheiden. Die Abscheidung von SiC mittels PECVD lässt sich sehr gut in die Prozesse der Solarzellenherstellung integrieren. So lassen sich z. B. Rückseitenverspiegelungen von Solarzellen realisieren, die gleichzeitig die elektrische Oberflächenpassivierung unterstützen. Eine andere Einsatzmöglichkeit sind Resonatorstrukturen, welche die Effizienz von Hochkonversionsprozessen erhöhen. Hierbei werden vom Silicium nicht nutzbare Photonen mit niedriger Energie in nutzbare, höherenergetische Photonen umgewandelt. Durch ein geschicktes Design der Resonanzwellenlängen lassen sich mithilfe der Multischichtsysteme die Absorption der einfallenden Photonen und die gewünschte Emission nutzbarer Photonen verstärken.

- 1 REM-Aufnahme einer Filterstruktur aus amorphen SiC-Verbindungen. Die Schichten wurden mit PECVD auf Silicium abgeschieden. Die Struktur ist für eine hohe Reflexion von Licht mit Wellenlängen größer als 1500 nm optimiert.
- 2 Selektiver Reflektor für den sichtbaren Spektralbereich, der durch eine abwechselnde Rotationsbeschichtung von PMMA und TiO<sub>2</sub> Nanopartikeln hergestellt wurde.

Für sichtbares Licht lassen sich Multischichtsysteme auch durch kostengünstige Rotationsbeschichtung herstellen (Abb. 2). Damit kann eine selektive Reflexion von nahezu 100 % erreicht werden (Abb. 3). Durch eine Variation der Schichtdicken lassen sich die spektrale Position des Reflexionspeaks verschieben und Nebenmaxima unterdrücken.

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



- 3 Reflexion eines sogenannten Bragg-Filters, der durch PECVD von SiO<sub>2</sub> und SiN hergestellt wurde. Es wird eine selektive Reflexion von nahezu 100 % erreicht.

# STROMVERSORGUNG EFFIZIENT



# REGENERATIVE STROMVERSORGUNG

Im ersten Halbjahr 2012 hat der Anteil der erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung in Deutschland erstmalig die 25 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 2012 bereits bei 5,1 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. Hierzu 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 1,4 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 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)
- IuK-Technologie-Labor für Energieanlagen und Steuerungssysteme
- SmartEnergyLab zur Entwicklung und Test von Smart-Grid-Lösungen
- 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
- Entwicklungslabor für Redox-Flow-Batteriesysteme
- Test- und Entwicklungslabor für Trinkwasseraufbereitungssysteme

*Im Rahmen des Projekts »Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität« entwickelten Ingenieure des Fraunhofer ISE eine universelle Ladesäule. Sie bietet sowohl die Infrastruktur zur Beladung von Elektrofahrzeugen über ihre On-Board-Ladegeräte als auch die Schnellladung über einen eigens entwickelten, in die Säule eingebauten, extrem kompakten 22 kW-Umrichter. Neben Laden und Rückspeisen sind weitere Funktionen, wie Energiemessung (Metering) und Abrechnung, die Fahrzeugauthentifizierung sowie Kommunikationslösungen integriert.*



**ANSPRECHPARTNER**

<b>Autarke Stromversorgungen und Inselnetze</b>	Dr. Matthias Vetter	Telefon +49 761 4588-5600 matthias.vetter@ise.fraunhofer.de
<b>Dezentrale, netzgekoppelte Energiesysteme (Smart Grids)</b>	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
<b>Leistungselektronik und Regelungstechnik</b>	Prof. Dr. Bruno Burger	Telefon +49 761 4588-5237 bruno.burger@ise.fraunhofer.de
<b>Elektrische Speichersysteme</b>	Dr. Matthias Vetter	Telefon +49 761 4588-5600 matthias.vetter@ise.fraunhofer.de
<b>Solare Kraftwerke</b>	Dr. Thomas Fluri	Telefon +49 761 4588-5994 thomas.fluri@ise.fraunhofer.de
<b>Dezentrale Wasseraufbereitung</b>	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
<b>Elektromobilität</b>	Dr. Günther Ebert	Telefon +49 761 4588-5229 guenther.ebert@ise.fraunhofer.de



## FELDTEST MIT PV-BETRIEBENEN UMKEHROSMOSEANLAGEN (PV-RO)

Ende 2011 konnten wir zwei photovoltaisch betriebene Umkehrosmoseanlagen zur Meerwasseraufbereitung auf Zypern in Betrieb nehmen. Es handelt sich dabei um die weltweit ersten Umkehrosmoseanlagen, deren Leistungsaufnahme sich dem momentanen Leistungsangebot der Sonne dynamisch anpassen lässt. Auf die Zwischenspeicherung von Energie in Batterien kann aufgrund der dynamischen Fahrweise idealerweise vollständig verzichtet werden. Nach einem Jahr können wir nun ein überwiegend erfreuliches Resümee bzgl. Auslegung, spezifischem Energiebedarf, Betrieb mit minimiertem Batteriespeicher, Regelungsalgorithmen, Degradation von Membranen und Zuverlässigkeit der verbauten Komponenten ziehen.

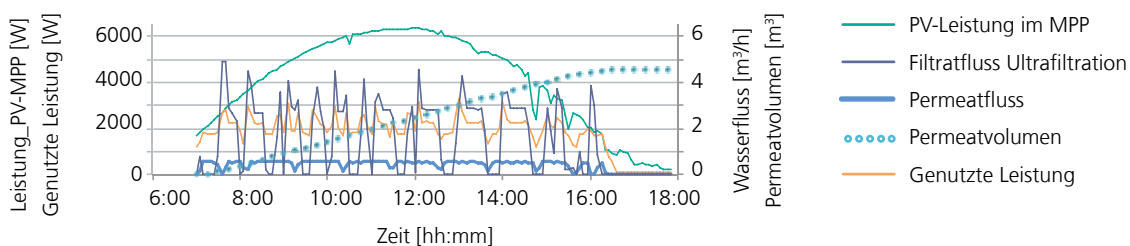
Julian Anhalt, Marcel Klemm, Sebastian Rauscher, Alexander Schies, Matthias Vetter, **Joachim Went**, Günther Ebert

Der Feldversuch bestätigte, dass mit der entwickelten Auslegungsmethode eine hohe Genauigkeit erreicht werden kann. Obwohl die dynamische Betriebsweise zum häufigen Teillastbetrieb der Anlagen führt, konnte mithilfe unserer flexiblen Energierückgewinnungseinheit ein sehr niedriger spezifischer Energiebedarf von unter  $4,6 \text{ kWh} / \text{m}^3$  erreicht werden (Abb. 3). Der Entsalzungsprozess benötigt keinen

- 1 Korrodiertes Ventil; Lochfraß an der Grundplatte des 3/2-Wegeventils, dem Herzstück der Energierückgewinnungseinheit.
- 2 PV-RO-Anlage auf Zypern (Pentakomo Lab).

Batteriespeicher. Die Verwendung kleiner Batteriespeicher ist zur Aufrechterhaltung der Automatisierungsfunktion und Internetverbindung zum Datenmonitoring sowie Remotezugriff sehr vorteilhaft. Die wechselnde mechanische Belastung der Umkehrosmosemembranen hat bisher zu keiner verfrühten Degradation geführt. Biofouling und Scaling konnten durch Flutung der Anlage mit Süßwasser über Nacht gemindert werden. Die Zuverlässigkeit einiger zugekaufter Komponenten war ungenügend: Eine defekte Befüllpumpe musste ausgetauscht werden und ein 3/2-Wegeventil, Herzstück der Energierückgewinnungseinheit, korrodierte trotz Verwendung meerwasserbeständiger Stähle stark. Für zukünftige Anlagen setzen wir auf die Vermeidung dieser kritischen Ventilkomponente durch eine neue Erfindung, die für PV-RO Anlagen einen noch geringeren spezifischen Energiebedarf bei sinkender Komplexität und Anlagenkosten erwarten lässt.

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) im Programm InnoNet und unseren Partnerfirmen Pairan Elektronik GmbH, IBC Solar AG, Gather Industrie GmbH, MAT Plasmatec GmbH, Katadyn Produkte AG und Technisches Büro Becker unterstützt.



3 Repräsentativer Tagesverlauf des Anlagenbetriebs vom 24.05.2012. Über die Ortszeit sind die Kenngrößen von verfügbarer und genutzter PV-Leistung, der Permeatfluss der Umkehrosmosestufe, der Filtratfluss der Ultrafiltration sowie das produzierte Süßwasservolumen aufgetragen.



## OPTIMIERTE LADEZUSTANDSBESTIMMUNG FÜR BLEIBATTERIEN

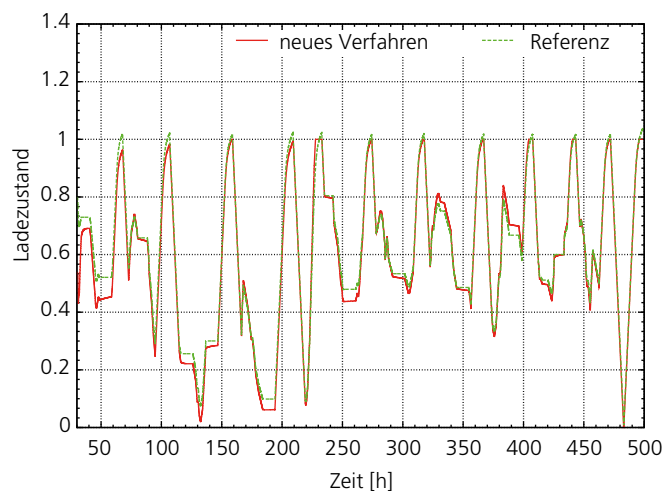
**Bleibatterien sind die am weitesten verbreiteten Akkumulatoren und werden nicht nur in autarken PV-Systemen und Inselnetzen in Schwellen- und Entwicklungsländern eingesetzt, sondern stellen auch eine Option für Speichersysteme zur Erhöhung des Eigenstromverbrauchs dar. Um eine genaue Aussage über die verbleibende Energiemenge machen zu können, sind Algorithmen zur Ladezustandsbestimmung notwendig. Hierbei hatten bisherige Verfahren massive Schwierigkeiten, da Zuverlässigkeit und Genauigkeit in vielen Betriebs- und Ladezuständen zu wünschen übrig ließen. Wir haben ein neues auf stochastischen Filtern basierendes Verfahren entwickelt, das den Ladezustand für alle Arten von Bleibatterien genau und zuverlässig bestimmt.**

Georg Bopp, Johannes Kehl, **Simon Schwunk**,  
Matthias Vetter, Günther Ebert

Vor allem in netzunabhängigen Stromversorgungen stellt die Ladezustandsbestimmung eine Herausforderung dar. Bei Anwendungen im Gabelstapler mit einem sehr zyklischen Betrieb oder in unterbrechungsfreien Stromversorgungen, in denen die Batterien beinahe ständig im Vollladezustand sind, ist eine Ladezustandsbestimmung anhand einer Vollladungserkennung und einer Bilanzierung des Batteriestroms vergleichsweise einfach. Bei photovoltaisch betriebenen Stromversorgungen mit langen Zeiten im mittleren Ladezustand ist diese Aufgabe deutlich komplexer. Wenn Strom fließt, ist ein Rückschluss von der Klemmenspannung einer Batterie auf den Ladezustand nicht ohne weiteres möglich. Viele Prozesse in der Batterie sorgen für eine Abweichung von der Ruhespannung.

Das neue Verfahren nutzt sehr viele von diesen Klemmenspannungsmessungen, filtert diese Messungen und kombiniert sie mit einer Bilanzierung des Batteriestroms über die Zeit. Dadurch erhält man schließlich eine gute Schätzung des

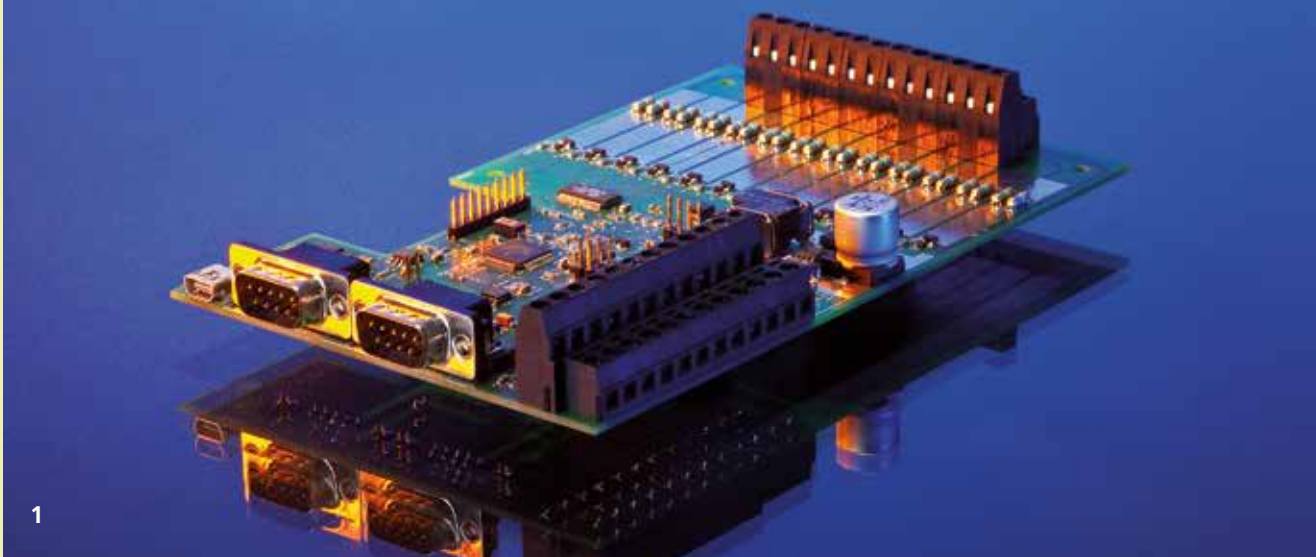
1 Die Rappenecker Hütte ist ein Beispiel für netzunabhängige Stromversorgung.



2 Dargestellt ist der vom entwickelten Verfahren zur Zustandsbestimmung präzise ermittelte Ladezustand und die Referenz. Anwendungsfall ist eine photovoltaisch betriebene netzunabhängige Stromversorgung.

Ladezustands. Bisherige Verfahren litten entweder an den fehlenden Möglichkeiten zur Korrektur oder waren nur für eine bestimmte Art von Bleibatterie entwickelt. Durch die Arbeiten des Fraunhofer ISE ist es nun gelungen, das Verfahren auf alle Arten von Bleibatterien zu übertragen und in jedem Betriebspunkt ständig zu korrigieren. Stochastische Verfahren lassen sich auch hervorragend auf andere Batterietypen anwenden.

Die Arbeiten wurden im Rahmen des vom Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Projekts »Pilebi« zusammen mit der Firma Steca durchgeführt.



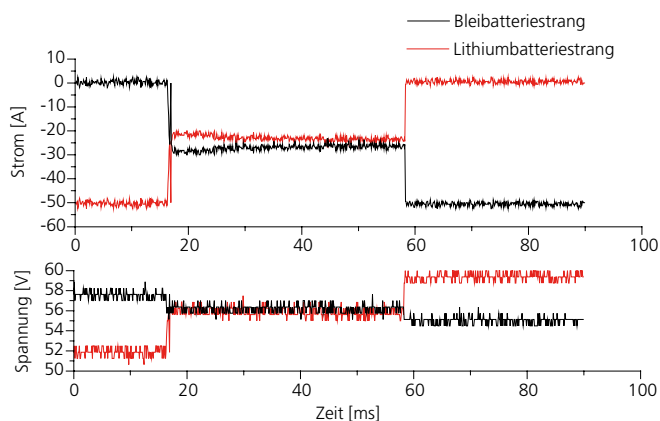
## INNOVATIVE SYSTEMTECHNIK FÜR DORFSTROMVERSORGUNGEN VON MORGEN

**Eine flächendeckende Energieversorgung ist in vielen Gebieten der Erde nicht gegeben, da diese entweder sehr abgelegen oder nicht ausreichend entwickelt sind. Dennoch gibt es dort einen Bedarf an elektrischem Strom, der bisher hauptsächlich durch Dieselgeneratoren gedeckt wird. Da dies mit hohen Kosten und starker Umweltbelastung verbunden ist, arbeiten wir an neuen technischen Lösungen, mit dem Ziel, die Energieversorgung effizienter, zuverlässiger und kostengünstiger zu gestalten. In den betroffenen Gebieten bietet sich die Photovoltaik als elektrische Energiequelle an. Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen eines Forschungsprojekts die Systemtechnik für PV-Hybridsysteme weiter entwickelt.**

Bruno Burger, Michael Eberlin, Max Jung, Severin Philipp, **Florian Reiners**, **Simon Schwunk**, Olivier Stalter, Matthias Vetter, Günther Ebert

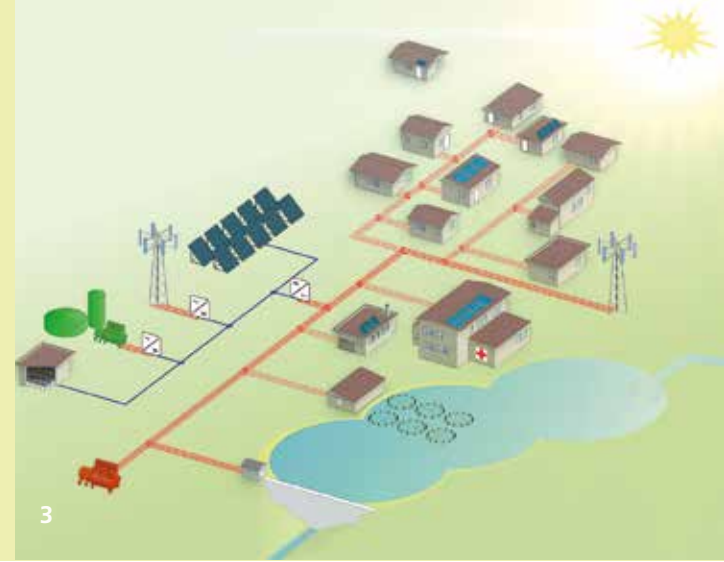
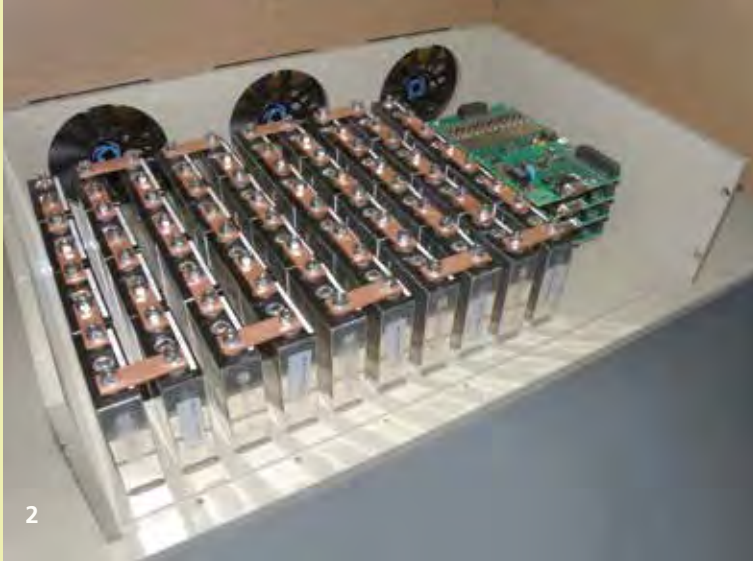
Die wesentlichen Komponenten der Dorfstromversorgung sind ein PV-Generator, ein hybrides Batteriesystem, ein Wechselrichter, ein PV-Batterieladegerät sowie ein übergeordnetes Energiemanagement. Die photovoltaisch erzeugte Energie wird über das Ladegerät im hybriden Batteriesystem zwischengespeichert, sollte der aktuelle Verbrauch nicht hoch genug sein. Kann die benötigte Energie nicht über Photovoltaik bereitgestellt werden, so wird sie aus der Batterie entnommen. Das System arbeitet mit Spannungen von bis zu 1000 V, um einen hohen Wirkungsgrad zu erreichen.

Ein wesentlicher Kostenfaktor, über die Lebensdauer einer solchen Stromversorgung gesehen, war bisher die Batterie. Üblicherweise werden Bleibatterien eingesetzt, die zwar günstig in der Anschaffung sind, aber gerade in solchen Anwendungen oft nur über eine sehr begrenzte Lebensdauer verfügen. Lithium-Ionen-Batterien würden sich aufgrund ihrer technischen Eigenschaften weit besser für solche Systeme eignen, sind aber bisher noch zu teuer. Durch die Kombination beider Systeme gelingt es, die Alterung der Bleibatterie um bis zu 40 % zu verringern. Die zusätzlichen Systemkosten, welche sich aus der Zusammenschaltung ergeben, sind gering, da zusätzliche Leistungselektronik vermieden werden konnte. In Abb. 4 ist ein solcher Umschaltvorgang dargestellt. Man erkennt, dass kurzzeitig beide Batteriesysteme Energie liefern. Bei geeigneter Umschaltstrategie lassen sich für die Batterien



**4** Umschaltvorgang vom Lithium-Ionen- auf den Bleibatteriestrang. Zunächst versorgt die Lithium-Ionen-Batterie die Last, dann teilt sich der Strom kurzfristig auf beide Batterien auf. Nach kurzer Zeit wird dann die Lithium-Ionen-Batterie vom DC-Bus getrennt und die Bleibatterie versorgt die Last alleine.



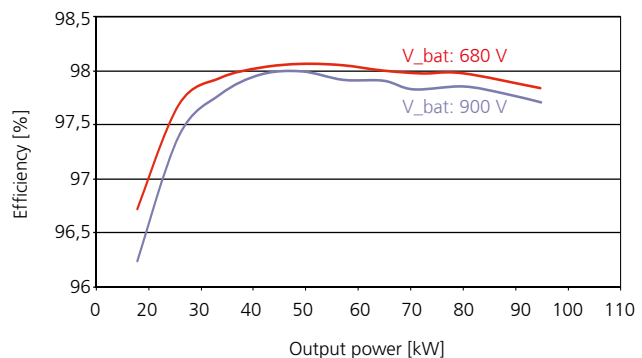


gefährlich hohe Umschaltströme vermeiden, so dass hierdurch kein Sicherheitsrisiko und auch keine Verringerung der Lebensdauer resultieren. Das Fraunhofer ISE hat das gesamte Batteriesystem konzeptioniert und entwickelt, inklusive des hochspannungsfähigen und modularen Batteriemanagementsystems, der Ladezustands- und Alterungsbestimmung, der Modulkonstruktion, der Umschaltvorrichtungen und der Umschaltstrategien.

Neben der Batteriesystemtechnik wurden am Fraunhofer ISE die für ein Dorfstromversorgungssystem notwendigen leistungselektronischen Komponenten entwickelt: ein 120 kW Batteriewechselrichter und ein 51 kW PV-Batterieladegerät. Der Schwerpunkt lag dabei auf einem möglichst effizienten, zuverlässigen und kostengünstigen Aufbau. Entgegen bisher verfügbaren Inselwechselrichtern wurde bei dem entwickelten System auf Hochsetzsteller und Transformatoren verzichtet, und stattdessen auf eine hohe DC-seitige Systemspannung gesetzt. In Verbindung mit einer hocheffizienten NPC-Topologie können so Wirkungsgrade über 98 % erreicht werden. Üblich sind heute maximal 95 %. Auch die hohe Ausgangsleistung ist bisher unerreichbar.

Das entwickelte PV-Batterieladegerät ermöglicht eine getrennte Regelung von bis zu sechs verschiedenen PV-Generatoren auf ihren Maximum Power Point (MPP). Durch die gewählte Hochsetzsteller-Topologie ergibt sich ein PV-Spannungsbereich von 350 V bis 1200 V, während die Batteriespannung zwischen 650 V und 1000 V liegen darf. Dieser große Spannungsbereich trägt zu einer hohen Flexibilität bei der Systemauslegung bei. Um die Umwandlungsverluste zu minimieren, kommen Super-Junction-Feldeffekttransistoren, sowie Siliciumcarbid-Dioden der neuesten Generation zum Einsatz. Wie auch beim Inselwechselrichter, wurde auf einen Transformator verzichtet. In ersten Messungen konnten Wirkungsgrade bis 99 % erreicht werden.

- 1 Platine eines hochvoltfähigen Modulmanagementsystems für Lithium-Ionen-Batterien. Die Platine misst die Zellspannung, symmetriert die Zellen und bestimmt den Zustand der Batterien.
- 2 Lithium-Ionen-Batteriemodul für ein hybrides Batteriesystem. Die Zellen sind in Serie verschaltet, werden luftgekühlt und von mehreren Modulmanagementplatinen überwacht.
- 3 Dorfstromversorgung mit Photovoltaik, Wind, Biomasse und Dieselgenerator. Das Netz wird über den zentralen Inselwechselrichter gebildet, die dezentralen Photovoltaikwechselrichter arbeiten netzgeführt.



- 5 Wirkungsgrade des entwickelten Inselwechselrichters bei verschiedenen Spannungen. Der Spitzenwirkungsgrad liegt über 98 %, der Verlauf des Wirkungsgrades ist über einen weiten Bereich konstant.



1



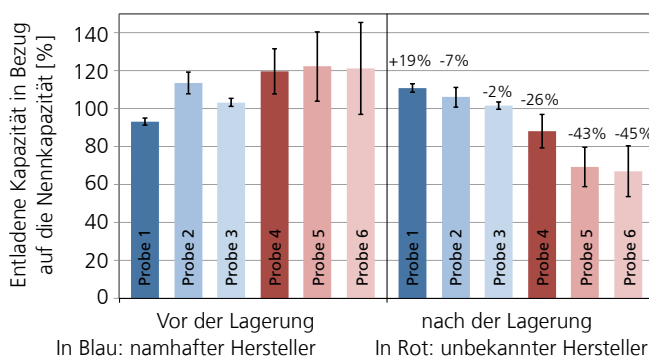
2

## QUALITÄTSSICHERUNG VON PV-LEUCHTEN: NEUE BATTERIE-TESTMETHODEN

Das Fraunhofer ISE wurde von der Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) beauftragt, die im Rahmen des »Lighting Africa« Programms der Weltbank / IFC entwickelten Prozeduren zur Qualitätssicherung von solar versorgten Leuchten zu erweitern und zu verbessern. Verschiedene Untersuchungen und Feldtests zeigten, dass insbesondere die Qualitätsprüfung von Batterien nicht ausreichend und umfassend genug war. Neue Batterie-Testmethoden erlauben nun, die Qualität besser und praxisnäher zu spezifizieren. Die Testverfahren wurden zudem auf aktuelle Speichertechnologien wie Lithium-Ionen-Batterien erweitert.

**Georg Bopp**, Evandro Augusto Dresch, **Norbert Pfanner**, Friedemar Schreiber, Matthias Vetter, Günther Ebert

Weltweit haben 1,4 Milliarden Menschen keinen Zugang zu Elektrizität. Zur Beleuchtung dienen häufig Petroleumlampen mit hohen Betriebsfolgekosten. Solarleuchten sind eine umweltfreundliche und kostengünstige Alternative, weisen jedoch deutliche Qualitätsunterschiede auf.



3 Ergebnisse eines Batterietests: Die Proben eines unbekanntes Herstellers zeigten deutliche Kapazitätsabnahmen und große Streuungen (schwarze Linien).

1 Typische Vertreter photovoltaisch versorgter Leuchten verschiedener Leistungsklassen.

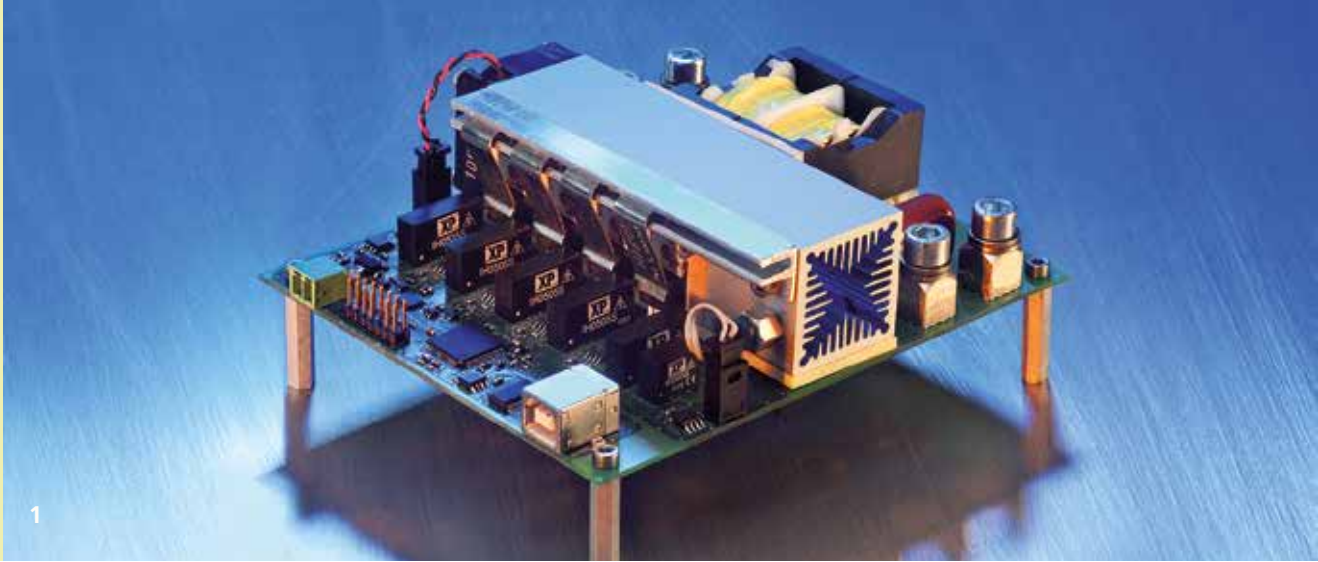
2 Elektrische Speicher, die in Solarleuchten eingesetzt werden: Nickel-Metallhydrid-, Lithium-Ionen- und Bleibatterien (v. l. n. r.).

Zur Qualifizierung solcher Produkte wurden von der »Lighting Africa«-Organisation, der GIZ und dem Fraunhofer ISE umfangreiche Testverfahren entwickelt und kontinuierlich verbessert. Feldtestergebnisse erforderten jedoch weitere Optimierung im Bereich der elektrischen Speicher.

PV-Leuchten nutzen verschiedene Batterietechnologien, von Bleibatterien bis zu Lithium-Ionen-Zellen. Bei manchen Produkten wird trotz Berücksichtigung angepasster Betriebs- und Lagerungsbedingungen nur eine sehr kurze Lebensdauer erreicht. Neue Testprozeduren, die eine vorzeitige Alterung für Blei-, NiMH- und Lithium-Ionen-Batterien nachweisen können, wurden hierfür entwickelt. Diese Testverfahren simulieren den regelmäßigen Gebrauch und die Lagerung der Leuchten und berücksichtigen die höheren Umgebungstemperaturen.

Wir konnten zeigen, dass die neu entwickelten Testverfahren sowohl bei hoch- als auch minderwertigen Batterien einen schnellen und einfachen Qualitätsnachweis bieten. Besonders bei der Lagerung wurden aussagekräftige Ergebnisse bereits nach wenigen Wochen erzielt. Die neuen Testverfahren erlauben nun auch bei Produkten mit offensichtlich guter Zyklenlebensdauer nachzuweisen, ob sie den besonderen Anforderungen, z. B. eines langen Transportwegs, standhalten.

Die Arbeiten wurden durch die Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) gefördert.



# HOCHEFFIZIENTE LEISTUNGSELEKTRONIK IM MEGAHERTZBEREICH

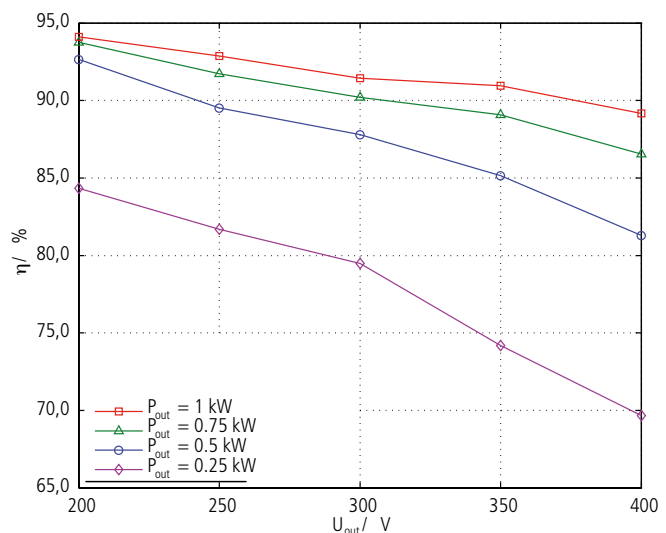
Halbleiter mit großer Bandlücke sind von großem Interesse für leistungselektronische Anwendungen. Neben den bereits auf dem Markt etablierten Leistungstransistoren aus Siliziumkarbid (SiC), sind nun erste 600 V-Leistungstransistor-Prototypen aus Galliumnitrid (GaN) verfügbar. Diese zeichnen sich aufgrund ihres lateralen Aufbaus durch sehr geringe Schaltenergien aus und ermöglichen dadurch wesentlich höhere Schaltfrequenzen als Bauelemente aus Silizium (Si) oder SiC. Mit steigender Schaltfrequenz können die passiven Bauelemente leistungselektronischer Schaltungen kleiner ausgelegt werden. Dies steigert die Leistungsdichte und reduziert neben Volumen und Gewicht auch die Produktionskosten des Gesamtsystems.

Bruno Burger, Dirk Kranzer, **Arne Hendrik Wienhausen**, Günther Ebert

DC/DC-Wandler sind in den unterschiedlichsten Leistungsklassen und Anwendungsgebieten von Consumer-Elektronik über Solarwechselrichter bis hin zu Ladegeräten von Elektrofahrzeugen zu finden. Neben dem elektrischen Wirkungsgrad sind Volumen, Gewicht und Kosten des Wandlers von großem Interesse. Im Fall von mobilen Systemen, z. B. Luft- und Straßenfahrzeugen, kann der Wirkungsgrad des Gesamtsystems durch Gewichtsreduktion gesteigert werden. Zudem können schädliche Emissionen gesenkt werden. Moderne resonante DC/DC-Wandler mit 600 V-Si-Superjunction-MOSFETs werden mit Schaltfrequenzen bis zu 350 kHz betrieben.

In einer internen Studie wurde am Fraunhofer ISE ein LLC-Resonanzwandler mit einer maximalen Schaltfrequenz von 1,4 MHz und einer Leistung von 1 kW entwickelt (Abb. 1). Dank modernster GaN-Leistungstransistor-Prototypen konnte trotz einer um den Faktor 4 höheren Schaltfrequenz und eines nicht für diesen Anwendungszweck optimierten Transforma-

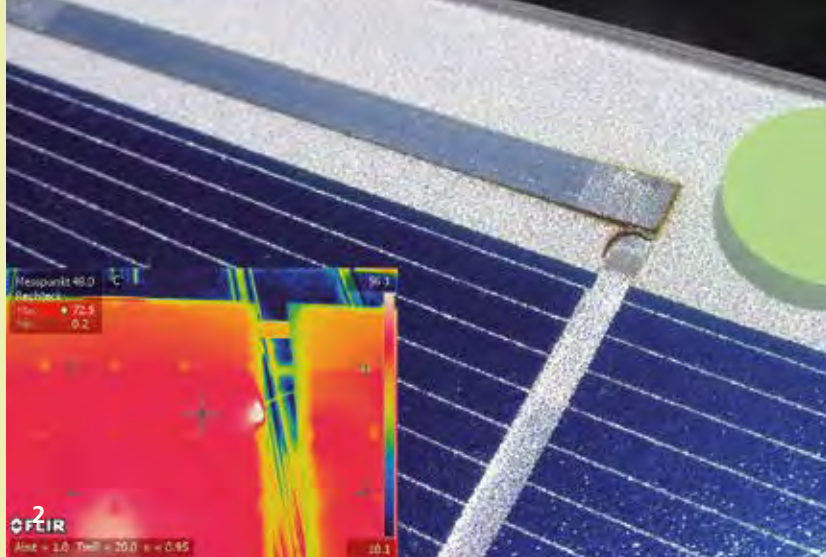
1 Erstes Labormuster des entwickelten Resonanzwandlers mit 600 V-GaN-Leistungstransistor-Prototypen. Durch weitere Optimierungen, wie Einsparung des Kühlkörpers und Stapelung der Platine, kann das Volumen weiter gesenkt und die Leistungsdichte gesteigert werden.



2 Wirkungsgrad des entwickelten Resonanzwandlers, aufgetragen gegen die Ausgangsspannung und für verschiedene Leistungen. Der Abfall zu geringeren Leistungen ist dabei topologiebedingt.

tors ein Wirkungsgrad von 94,1 % erreicht werden. Nahezu alle Verluste konnten dabei in den Wicklungen des Transformators lokalisiert werden. Die GaN-Leistungstransistoren erfuhr selbst bei einer übertragenen Leistung von 1 kW und einer Schaltfrequenz von 1 MHz nur eine kaum messbare Temperaturerhöhung. Dies zeigt zum einen die hervorragenden Halbleitereigenschaften von GaN, zum anderen den großen Forschungsbedarf im Bereich der induktiven Bauelemente. Man kann davon ausgehen, dass Galliumnitrid die Welt der Leistungselektronik – besonders im Bereich der PV und der resonanten Spannungswandler – dauerhaft verändern wird.



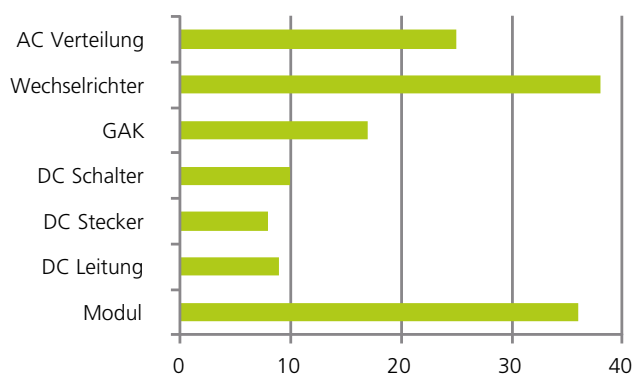


# BRANDGEFAHREN, BRANDSCHUTZ UND BRANDVERMEIDUNG IN PV-ANLAGEN

In den letzten Jahren machten Brandfälle, bei denen Gebäude mit Photovoltaikanlagen betroffen waren, bundesweit Schlagzeilen. Das war für das Fraunhofer ISE gemeinsam mit dem TÜV Rheinland und weiteren Partnern Anlass, systematisch zu untersuchen, welche Gefahren von PV-Anlagen bei Bränden ausgehen und was man tun kann, um die Risiken zu verringern. Dabei haben wir einige der öffentlichkeitswirksamen Brandfälle mit PV analysiert sowie Detailrecherchen zu Schadensverläufen durchgeführt. Weitere Arbeitsschwerpunkte sind Maßnahmen gegen Lichtbogenentstehung, Verfahren zur automatischen Erkennung und Abschaltung von Lichtbögen sowie Methoden zur zuverlässigen Prüfung entsprechender Geräte.

Georg Bopp, Robin Grab, Hermann Laukamp, Severin Phillip, Heribert Schmidt, Günther Ebert

Wir erfassen und analysieren systematisch Berichte zu Brandschäden in PV-Anlagen, um Anlagentechnik und Errichtungspraxis weiter zu verbessern. Über eine gemeinsam mit dem TÜV Rheinland durchgeführte internet-basierte Umfrage,



3 Bei welcher System-Komponente sind wie viele Hitze- und Brandschäden aufgetreten? Anzahl der Fehler auf Basis von ca. 100 Brandfällen in PV-Anlagen.

1 Brand einer PV-Anlage auf einem Flachdach. Der Gutachter fand Modulreste, die schlechte Lötverbindungen als Ursache sehr wahrscheinlich machen.

2 Lokale Überhitzung an einer mangelhaften Lötstelle im Infrarotbild und dieselbe Stelle in Nahaufnahme.

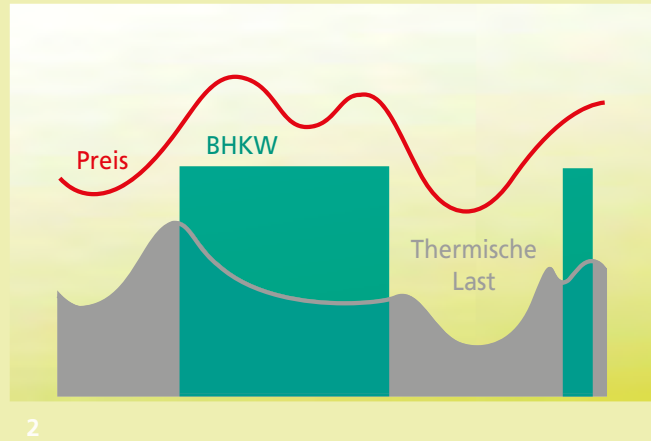
Recherchen in Medien und Kontakte mit Gutachtern und Versicherungen versuchen wir, die jeweilige Schadensursache zu ermitteln. Über einen Zeitraum von 20 Jahren sind uns bei einer derzeit in Deutschland installierten Anzahl von ca. 1,3 Millionen PV-Anlagen etwa 75 Fälle bekannt, bei denen durch eine PV-Anlage ein größerer Brandschaden an einem Gebäude entstand. In etwa 40 weiteren Fällen wurden Komponenten nur mit Überhitzungsspuren, ohne Brand, entdeckt. Abb. 3 zeigt, wie häufig welcher Anlagenteil von Brand- oder Hitzeschaden betroffen war. Nimmt man die Fälle hinzu, in denen Gebäude mit PV-Anlagen aus anderen Gründen in Brand gerieten, so kommt man auf ca. 350 Brandfälle mit Feuerwehreinsatz.

In einigen Staaten der USA wird seit 2012 in netzgekoppelten PV-Anlagen der Einbau eines Lichtbogendetektors gefordert, der die Anlage bei Auftreten eines Lichtbogens abschalten soll. Um die deutsche Industrie bei der Entwicklung und dem Test solcher Detektoren zu unterstützen, werden im Rahmen des Projekts Untersuchungen zur Entstehung, Ausbreitung und Detektion von Lichtbögen durchgeführt. Am Fraunhofer ISE werden dazu Lichtbögen in möglichst realistischen Versuchsbedingungen in einer realen PV-Anlage erzeugt. Unser Ziel ist es, Referenzspektren zur reproduzierbaren Prüfung von Lichtbogendetektoren zu erzeugen.

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

[www.pv-brandsicherheit.de](http://www.pv-brandsicherheit.de)





# VORHERSAGEBASIERTE BETRIEBSFÜHRUNGS-STRATEGIEN IM SMART GRID

Im Zuge der Smart Grid-Entwicklung steigen die Anforderungen an dezentrale Erzeuger, Verbraucher und Speichersysteme. Dezentrale Einheiten sollen neben ihrer lokalen Kernaufgabe (z. B. Sicherstellung der Wärmeversorgung bei einem Blockheizkraftwerk) dazu beitragen, die schwankende Erzeugung aus erneuerbaren Energien auszugleichen, und gleichzeitig Netzserviceleistungen anbieten. Innovative Steuerungsstrategien ermöglichen eine vorausschauende Betriebsweise, die kurzfristig auf dynamische Anreize reagiert und Flexibilität optimal ausnutzt. Wir entwickeln hierzu Betriebsführungsalgorithmen, die Vorhersagen als Basis für die Berechnung optimaler Anlagenfahrpläne nutzen und in Steuerbefehle umsetzen.

Thomas Erge, **Raphael Hollinger**, Bernhard Wille-Haußmann, Christof Wittwer, Günther Ebert

Vorausschauendes Planen, für den Menschen eine Selbstverständlichkeit, spielt bei der Steuerung dezentraler Anlagen im Energiesystem heute keine Rolle. Für konventionelle Kraftwerke müssen individuelle Fahrpläne angemeldet werden. Somit ist für diese Kraftwerke eine vorhersagebasierte Fahrplanoptimierung alltäglich. Dezentrale Kraftwerke, Verbraucher und Speicher hingegen werden meist lediglich auf Basis momentaner Leistungsanforderungen betrieben (z. B. wärmegeführter Betrieb eines Blockheizkraftwerks).

- 1 Webbasierte Konfigurationsoberfläche der OpenMUC-Software zur Steuerung und zum Monitoring der Anlagen.
- 2 Optimierter Fahrplan für ein Blockheizkraftwerk auf Basis der vorhergesagten thermischen Last sowie einer Preiskurve.

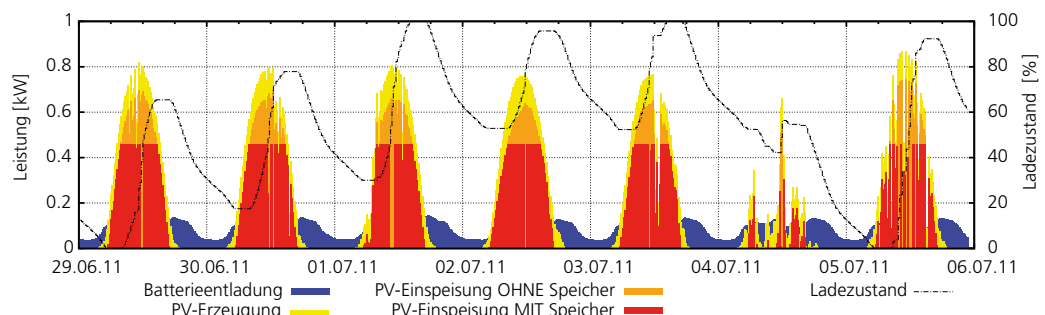
Erst die vorausschauende Einsatzplanung der lokalen Erzeuger sowie die Nutzung der zur Verfügung stehenden Speichersysteme ermöglicht jedoch z. B. optimale Stromerzeugung in Zeiten hoher Nachfrage, Glättung der PV-Einspeise- und Strombezugsspitze und priorisierte Nutzung von Strom aus regenerativer Erzeugung.

Unser Algorithmus besteht aus drei Stufen:

1. Erstellung von Prognosen (z. B. lokaler Wärmebedarf)
2. Erstellung des idealen Fahrplans auf Basis der Vorhersage und ggf. externer Anreize
3. Steuerung der Anlage mit möglichst geringen Abweichungen vom erstellten Fahrplan

Diese werden, während des kontinuierlichen Betriebs, regelmäßig nach dem Prinzip des gleitenden Horizonts wiederholt, um dynamisch auf veränderte Anreize und Abweichungen bei der Vorhersage reagieren zu können. Der Algorithmus wurde bereits erfolgreich für langfristige Zeithorizonte wie den Day-Ahead-Handel von Strom aus dezentralen Erzeugern und für kurzfristige Zeithorizonte (Optimierung alle 15 Minuten) im Zuge einer modellprädiktiven Steuerung eingesetzt.

- 3 Optimale Batterieladestrategie für ein Gebäude mit PV-Anlage, mit dem Ziel, die Einspeisespitze sowie Lastspitze zu reduzieren und den Eigenverbrauch zu maximieren.





## KONZEPTE UND FELDVERSUCHE FÜR ELEKTROFAHRZEUGE IM SMART GRID

**Elektrofahrzeuge im Verteilnetz sind bei entsprechender Verbreitung nicht nur eine Herausforderung, sondern auch eine Chance für einen stabilen Netzbetrieb. Sowohl für die Vermeidung von Lastspitzen als auch für die Dämpfung des Solarpeaks zur Mittagszeit kann das Lastverschiebungspotenzial von Elektrofahrzeugen genutzt werden. Hierfür entwickelt und erprobt die Abteilung »Smart Grids« des Fraunhofer ISE innovative Lösungen und Pilotsysteme. 2012 ist der vom Bundesumweltministerium geförderte »Flottenversuch Elektromobilität« erfolgreich beendet worden. Gleich mehrere Nachfolgeprojekte sind im Lauf des Jahres gestartet.**

**Robert Kohrs**, Michael Mierau, Dominik Noeren, Christof Wittwer, Günther Ebert

Elektromobilität ist heute ein ernsthaftes Marktsegment, alle namhaften Hersteller arbeiten an Serienfahrzeugen und Netzintegrationsfragen. Auch die Bundesregierung hat ihr Ziel von einer Million Elektrofahrzeugen im Jahr 2020 bekräftigt. Entsprechend relevant werden Konzepte zur Lastverschiebung, Netzdienstleistungen und Speichernutzung im Smart Grid sowie spezielle Netzanschlussbedingungen.

Arbeitsschwerpunkt des Fraunhofer ISE beim »Flottenversuch Elektromobilität«, ein vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) gefördertes Projekt, war die Entwicklung eines tarifgesteuerten Ladesystems, das auch die Rückspeisung der Energie ins Stromnetz erlaubt. Das Besondere an dem umgesetzten Konzept: Der Optimierungsalgorithmus läuft im Fahrzeug, im dafür entwickelten sogenannten mobilen Smart Meter (mSM). Zeitvariable Tarife spiegeln Erzeugung und Last im Netz wider und werden neben Nutzerwünschen und Batterieparametern zur Berechnung eines kostenoptimalen Ladefahrplans verarbeitet. Nach umfangreichen Tests in den Werkstätten von VW wurde das

**1** Die Ladestation für Elektrofahrzeuge am Fraunhofer ISE ist mit dem Smart Energy Lab verbunden. Dies ermöglicht Tests von Kommunikationsprotokollen und Betriebsführungsstrategien im Smart Home.

**2** Als zentraler Lademanager ist der mobile Smart Meter (mSM) sowohl im Fahrzeug (CAN-Bus) als auch über die Ladestation mit dem Energieversorger oder Netzbetreiber vernetzt.

System erfolgreich im Feldversuch erprobt. Über ein im mSM hinterlegtes Batteriemodell wird die Batteriedegradation berücksichtigt. Eine Rückspeisung findet nur statt, wenn diese für den Nutzer wirtschaftlich ist.

Dieses Konzept soll im Projekt »iZEUS« mit der Adam Opel AG und weiteren Partnern weitergeführt und erweitert werden. Schwerpunkt ist die hochaufgelöste Netzüberwachung im Fahrzeug und eine daraus abgeleitete eigenständige Anpassung der Ladeparameter. Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.

Ebenfalls seit Anfang 2012 erarbeitet das Fraunhofer ISE im Rahmen des Fraunhofer Zukunftsthemen-Projekts »Gemeinschaftlich-e-Mobilität« ein intelligentes, induktives Ladesystem mit einem zentralen Energiemanagementsystem für die urbane Mobilität von übermorgen.

Als Teilprojekt des Schaufensters Elektromobilität »LivingLab BWe mobil« wird in der Stadt Fellbach die Integration von Elektrofahrzeugen in das Energiesystem einer Passivhausgruppe demonstriert. Hier kommt u. a. das am Fraunhofer ISE entwickelte Energiemanagement-Framework openMUC ([www.openMUC.org](http://www.openMUC.org)) zum Einsatz.

[www.izeus.de](http://www.izeus.de)

[www.gemo.fraunhofer.de](http://www.gemo.fraunhofer.de)



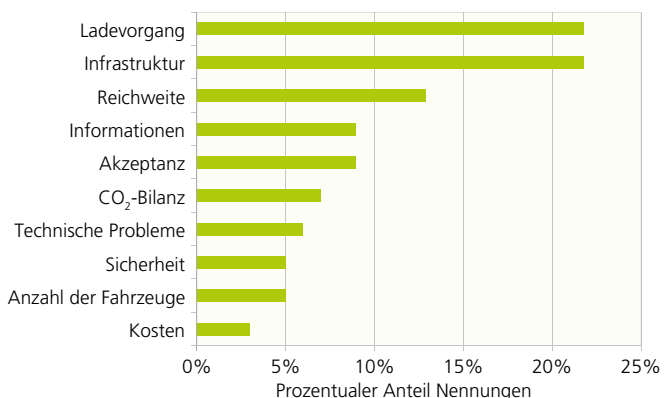
## POTENZIALSTUDIE ZU ELEKTROAUTOS IN DER CARSHARING-FLOTTE

Im Projekt »Lörrach elektrisch mobil« untersuchte das Fraunhofer ISE, ob die Hälfte der Autos im Fuhrpark des CarSharing-Anbieters Stadtmobil durch Elektroautos ersetzt werden können. Das Fraunhofer ISE führte eine zweistufige Analyse durch, bei der zuerst das technische Potenzial von Elektroautos bestimmt wurde. Anschließend wurden CarSharing-Nutzer befragt, um die Bedürfnisse an Mobilität und die wahrgenommene Passung mit Elektromobilität zu ermitteln. Das Fraunhofer ISE konnte ein technisches Potenzial von Elektroautos im CarSharing feststellen, das durch die Befragung bestätigt wurde: 80 % der Kunden bewerten die Einführung von Elektroautos als positiv. Über 60 % können sich eine bevorzugte Nutzung von Elektroautos vorstellen.

Sebastian Gölz, Ulf Hahnel, Dominik Noeren, Christof Wittwer, Günther Ebert

Die Stadt Lörrach als Energiestadt® möchte in Zusammenarbeit mit CarSharing eine klimafreundliche Mobilität fördern. Im Rahmen der Potenzialstudie des Projekts »Lörrach elektrisch mobil« untersuchte das Fraunhofer ISE, ob die Hälfte der Fahrzeuge im Fuhrpark des lokalen CarSharing-Anbieters Stadtmobil durch Elektroautos ersetzt werden können. Bei diesem Projekt lag der Fokus auf zwei Fragen: Sind Elektroautos angesichts des bisherigen Mobilitätsverhaltens der CarSharing-Kunden als Fahrzeuge geeignet? Und stoßen Elektroautos auf Akzeptanz bei den aktuellen Kunden von CarSharing, bzw. bieten sie möglicherweise eine besondere Attraktivität? Anhand bisheriger Mobilitätsdaten, deren Auswertung das Fraunhofer ISE begleitete, sowie aus den Erkenntnissen einer Befragung des Fraunhofer ISE mit aktuellen CarSharing-Kunden konnte gezeigt werden, dass von einem Potenzial für Elektrofahrzeuge im CarSharing-Pool ausgegangen werden kann. Das Fraunhofer ISE stellte fest, dass die allgemeine Hauptsorge der Nutzer ist, dass sie mit

1 Ein erster Vorgeschmack auf die kommende Einführung von Elektrofahrzeugen in die CarSharing-Flotte von Stadtmobil. Projektpartner Michael Nowack (Stadtmobil), Christine Wegner-Sänger und Arne Lüers (beide Stadt Lörrach) neben einem Elektroauto.



2 Prozentualer Anteil der von den Kunden genannten Herausforderungen für das CarSharing durch die Einführung von Elektrofahrzeugen.

einem Elektroauto »liegen bleiben« könnten. Größte wahrgenommene Herausforderungen waren die Ladezeit und die Notwendigkeit einer angemessenen Infrastruktur (Abb. 2). Dennoch scheint dies die meisten Nutzer nicht daran zu hindern, ein Elektroauto ausleihen zu wollen. Ein solches Angebot wird als Möglichkeit gesehen, Elektroautos auszuprobieren und bisherige fehlende Erfahrungen mit E-Fahrzeugen zu sammeln. Nach den positiven Ergebnissen der Studie des Fraunhofer ISE folgt nun die Einführung von Elektroautos in den Fahrzeug-Pool von Stadtmobil.

Das Projekt »Lörrach elektrisch mobil« wurde vom badenova Innovationsfonds Klima- und Wasserschutz gefördert.



# 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 eröffneten wir eine öffentliche Wasserstoff-Tankstelle mit solarer Wasserstoff-erzeugung 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 normengerechte 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.

*Das Fraunhofer ISE hat 2012 eine solare Wasserstoff-Tankstelle eingeweiht. Gefördert vom Umweltministerium Baden-Württemberg stellt die öffentlich zugängliche Tankstelle nicht nur eine Forschungsplattform dar, sie ist gleichzeitig ein Meilenstein im Wasserstoff-Tanknetz des Landes. Die Freiburger solare Wasserstoff-Tankstelle ist eine von wenigen, die die gesamte Energiekette – vom regenerativ erzeugten Strom über die Elektrolyse bis zur Betankung – aufweist (s. S. 131). Das Fraunhofer ISE befasst sich seit seiner Gründung mit der Elektrolysetechnik und dem Wasserstoff als Treibstoff für Brennstoffzellen sowie als Speichermedium für regenerativ erzeugten Strom.*

**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

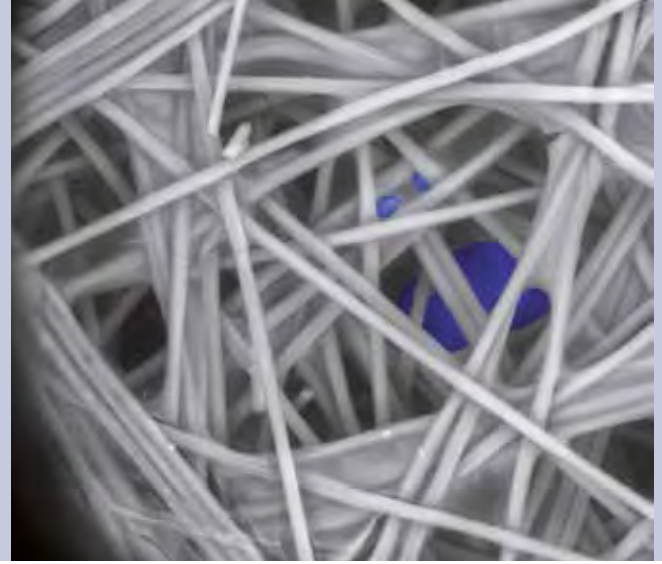
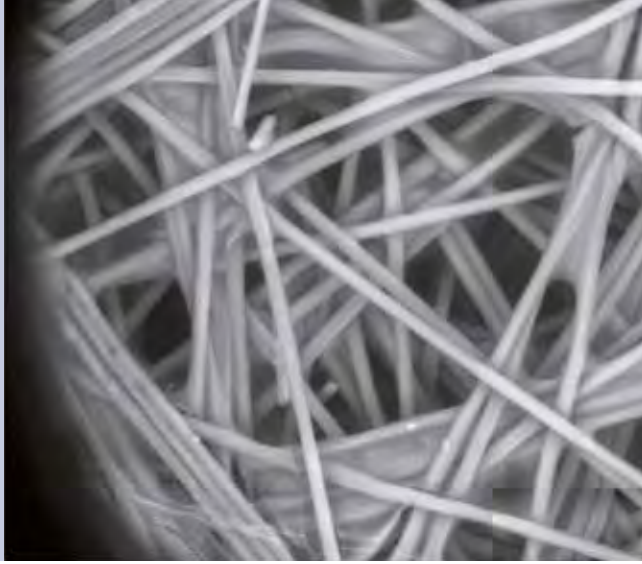
---

Dr. Tom Smolinka

Telefon +49 761 4588-5212

tom.smolinka@ise.fraunhofer.de

---



## WASSERMANAGEMENT IN POLYMER-ELEKTROLYT-MEMBRAN-BRENNSTOFFZELLEN

**Im Rahmen des Verbundprojekts »PEM-Ca-D« arbeiten wir in enger Kooperation mit führenden kanadischen und deutschen Forschungseinrichtungen an der Optimierung des Wassermanagements in Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzellen. Mithilfe von innovativen in-situ und ex-situ Charakterisierungstechniken, kombiniert mit computergestützten Modellierungsarbeiten, wird an grundlegenden Fragestellungen bezüglich des Transports und der Verteilung von Wasser sowie dessen Auswirkung auf die Brennstoffzellenleistung und deren Stabilität geforscht. Unser Ziel ist es, Optimierungspotenzial herauszuarbeiten, um daraus verbesserte Materialstrukturen zu entwickeln.**

Robert Alink, **Dietmar Gerteisen**, Ulf Groos, Nada Zamel, Christopher Hebling

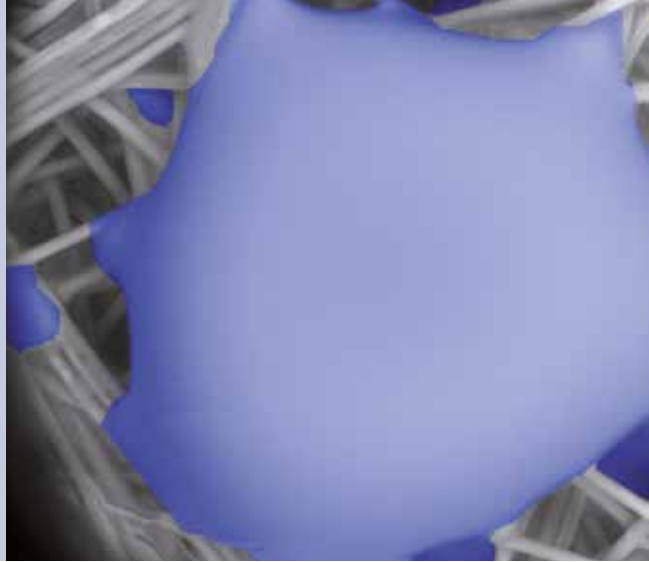
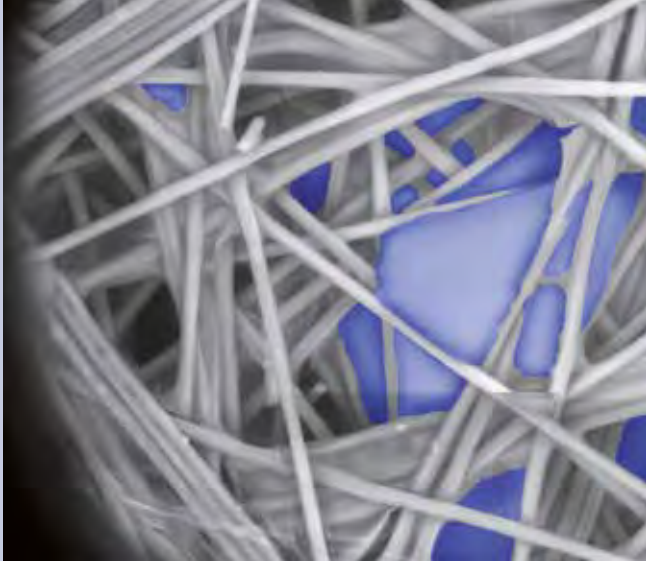
Wasser ist das Lebenselixier von Polymerelektrolyt-Membran-Brennstoffzellen. Es wird bei der Redox-Reaktion von Wasserstoff und Sauerstoff gebildet und ist für die Protonenleitung in der Membran und Katalysatorschicht notwendig. Gleichzeitig muss die Flutung der für den Gastransport notwendigen porösen Strukturen verhindert werden. Ein unzureichendes Wassermanagement im Betrieb der Brennstoffzelle kann deren Leistungsdichte reduzieren, temporäre Leistungseinbrüche verursachen sowie die Lebensdauer vermindern. Wassermanagement ist deshalb ein entscheidender Faktor, der die Prozesse in den Brennstoffzellenkomponenten auf allen Skalenebenen beeinflusst.

**1** *Zeitliche Entwicklung des kapillaren Transports von flüssigem Wasser durch eine Gasdiffusionsschicht in einem hochauflösenden ESEM-Aufbau.*

Unterschiedlichste Kompetenzen, wie die 3D-Rekonstruktion der Katalysatorschicht mittels FIB-SEM, die Visualisierung von flüssigem Wasser in-operando durch Synchrotron-Radiographie oder die orts aufgelösten Stromdichtemessung und elektrochemische Impedanzspektroskopie, werden durch unsere Partner wie dem Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung (ZSW), dem Institut für Mikrosystemtechnik (IMTEK) der Universität Freiburg, dem Fraunhofer ITWM, dem Institut für Technische Thermodynamik des DLR in das Projekt eingebracht.

Am Fraunhofer ISE arbeiten wir an der Optimierung des Transports von flüssigem Wasser von der Katalysatorschicht zur Gasverteilerstruktur. Dazu untersuchen wir den Effekt der Strukturierung von Gasdiffusionsschicht (GDL) und der Mikroporösen Schicht (MPL) auf den Wasseraustrag. Um beispielweise den Einfluss einer GDL-Perforierung auf den Wassertransport hochauflösend zu visualisieren, haben wir eine innovative Bildgebungsmethode mit einem Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) entwickelt.





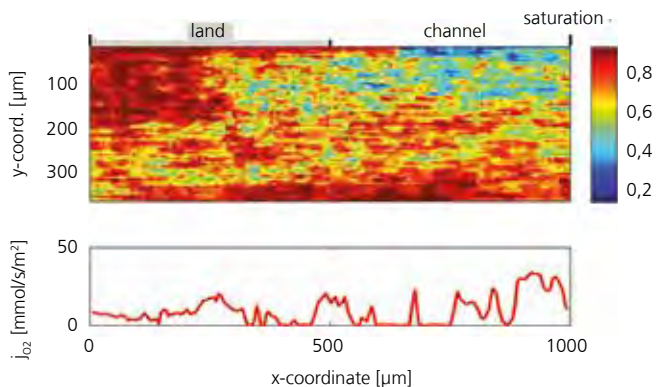
Über einen definiert erzwungenen Temperaturgradient innerhalb der GDL-Probe konnten wir erstmalig die zeitliche Akkumulation und den durch Druckanstieg resultierenden kapillaren Transport von flüssigem Wasser örtlich hochaufgelöst visualisieren.

Zur Simulation des Flüssigwassertransports in porösen Strukturen wie der Gasdiffusionsschicht haben wir ein neuartiges faserbasiertes Perkolationsnetzwerkmodell entwickelt. Grundlage dieses Modells ist ein Algorithmus, der stabile sphärische Wassermenisken zwischen den GDL-Fasern mit variablen Kontaktwinkeln sucht, um so bei gegebenem Wasserdruck die Perkolation zu simulieren. Dieser rechenintensive Pre-Prozess zur Generierung des Wasserpfadnetzwerks zahlt sich durch eine schnelle Rechenzeit bei der Kopplung mit einem Kontinuum-Brennstoffzellenmodell aus. Durch die Bestimmung der Wasserverteilung in der GDL kann mittels des Brennstoffzellenmodells die Stromproduktion simuliert und zur Materialoptimierung eingesetzt werden.

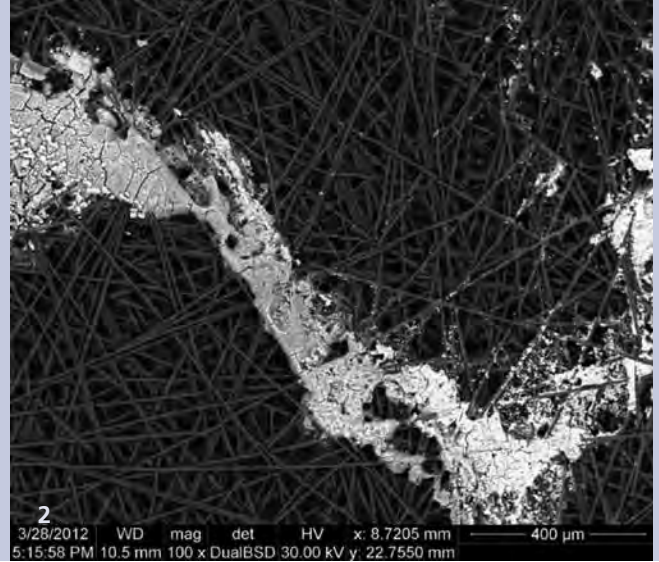
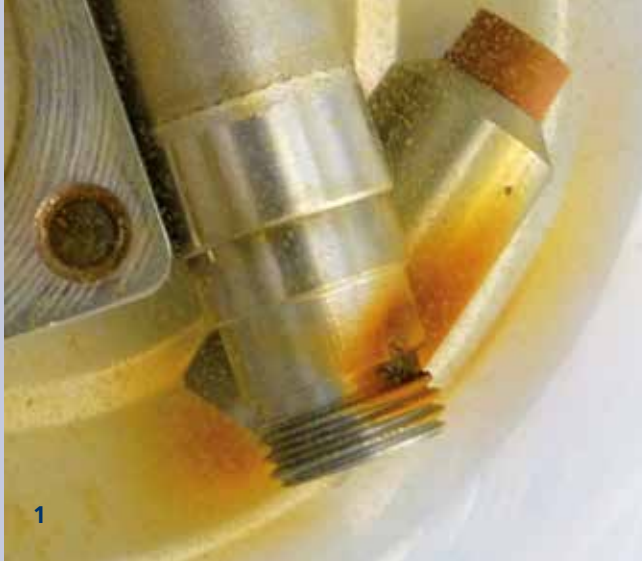
Die Simulationen zeigen zum einen sehr starke Massentransporthemmung, verursacht durch die Akkumulation von Wasser am Übergang zur Katalysatorschicht, und zum anderen Möglichkeiten, wie die GDL gezielt entwässert werden kann.

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

[www.pem-ca-d.com](http://www.pem-ca-d.com)



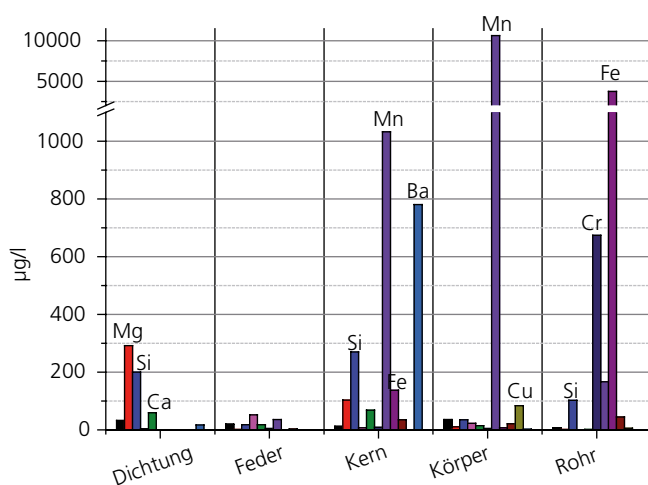
2 Oben: Simulation der Sättigungsverteilung von Wasser in der GDL unter der Annahme von Kondensation unterhalb des Stegs. Unten: Die molare Sauerstoffflussdichte am Übergang zur Katalysatorschicht (CL), die über das Faraday-Gesetz linear mit der Stromproduktion skaliert, zeigt den starken Einfluss der Wasserakkumulation in der Nähe der GDL/CL-Grenzschicht (unterer Rand der Simulation).



# CHEMISCHE BESTÄNDIGKEIT VON BRENNSTOFFZELLENSYSTEMKOMPONENTEN

Komponenten von Brennstoffzellensystemen müssen im Dauerbetrieb harten Belastungen standhalten. Sie sind in Kontakt mit Produktwasser und mit durch Nebenreaktionen entstehenden Säuren, und das bei Temperaturen zwischen -40 °C und +80 °C. Viele Komponenten korrodieren unter diesen Bedingungen. Dies kann zum Ausfall der Komponente führen, aber auch zur Schädigung der Brennstoffzelle durch sich herauslösende Materialien. Die Datenblätter sind für die Beurteilung einer Eignung für Brennstoffzellensysteme nicht ausreichend. Deshalb wurden realitätsnahe Beständigkeitstests entwickelt, die für die Auswahl der Komponenten wichtige Hinweise liefern.

Anneke Georg, Ulf Groos, Wolfgang Koch, Lisabeth Wagner, Christopher Hebling



3 ICP-MS Analyse von Ventiltteilen nach 8 Wochen in DI-Wasser. Die Mangan-Konzentration ist sehr hoch. Besonders bedenklich ist das sich herauslösende Eisen wegen der zerstörerischen Wirkung auf die Membran. Trotz laut Datenblatt gleichen Materialien lösen sich unterschiedliche Elemente aus den Ventiltteilen.

1 Korrodierte Ventiltteile in DI-Wasser.  
2 REM / EDX Messung: Cr, Mn, Fe, Ni, Ca Ablagerungen auf einer Gasdiffusionslage nach Dauerbetrieb.

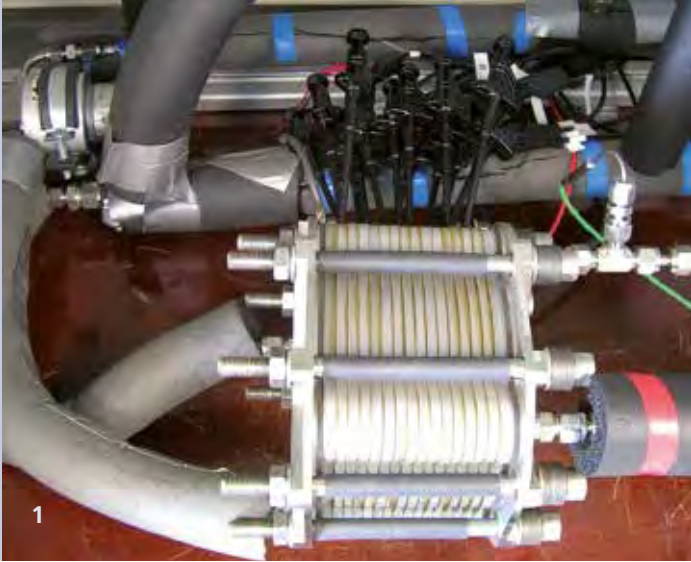
Komponenten (z. B. Schläuche, Verbinder, Pumpen) wurden folgenden Beständigkeitstest ausgesetzt:

- Gefrier-Auftau-Zyklen (-20 bis +50 °C, 5 mal je 10 h)
- Erhitzen in de-ionisiertem (DI) Wasser (100 °C, 5 mal 24 h)
- Einlagern der medienberührenden Teile in DI-Wasser und in H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (8 Wochen)

Letztere Lösungen wurden einer Elementanalyse mit ICP-MS (Inductively Coupled Plasma – Mass Spectroscopy) unterzogen (Abb. 3). Die Komponentenoberflächen wurden mit Licht- und Elektronenmikroskop (REM) und ihre Elementzusammensetzung mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (EDX) untersucht (Abb. 2).

Es zeigte sich, dass Edelstahlkomponenten in Brennstoffzellensystemen stark korrodieren können (Abb. 1). Die Korrosionsanfälligkeit von Edelstählen kann sich durch die weitere Bearbeitung oder durch Kontakt mit edleren Metallen verstärken. Aus den Komponenten herausgelöste Elemente finden sich auch im Produktwasser. Sie können in der Brennstoffzelle Ablagerungen bilden (Abb. 2), oder die chemische Beständigkeit oder die Leitfähigkeit der Membran verringern. Schmiermittel oder Beschichtungen werden vom Hersteller oft nicht angegeben. Insgesamt erwiesen sich die Beständigkeitstests, verbunden mit Elementanalyse, als wichtige Hilfsmittel für die Komponentenauswahl für Brennstoffzellensysteme.

Das Projekt wurde im Rahmen des Brennstoffzellen-Kleingüterprogramms mit dem Partner DMT Produktentwicklung AG vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi) gefördert.



# DYNAMISCHE MODELLIERUNG EINES POWER-TO-GAS ENERGIESPEICHERSYSTEMS

Regenerativ gewonnener Strom fällt zeitlich fluktuierend an, aus dem Netz wird Strom jedoch nach Bedarf entnommen. Daher steigt die Notwendigkeit, große Mengen an elektrischer Energie flexibel zwischenspeichern zu können. Eine Variante ist die chemische Speicherung der elektrischen Energie in Form von Substitute Natural Gas (SNG) im Erdgasnetz. Dabei erzeugt ein PEM-Elektrolyseur Wasserstoff, der anschließend zu Methan umgesetzt wird. Während der PEM-Elektrolyseur der fluktuierenden Stromspeisung weitgehend folgen kann, wird der Methanisierungsreaktor im Idealfall bei konstanter Last betrieben. Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, den Wasserstoff aus der Elektrolyse im System zu puffern. Zur Auslegung des Gesamtsystems wurde ein dynamisches Systemmodell aufgestellt.

Thomas Aicher, Christopher Hebling

Zur Speicherung elektrischer Energie im Erdgasnetz wird neben der direkten Einspeisung von Wasserstoff die Einspeisung von SNG erwogen. Dazu ist es erforderlich, den Wasserstoff in Methan umzuwandeln und auch im geringen Umfang leichte Kohlenwasserstoffe mittels Fischer-Tropsch-Synthese aus Wasserstoff und Kohlendioxid zu erzeugen (Brennwertanpassung) und dem Methan beizumischen.

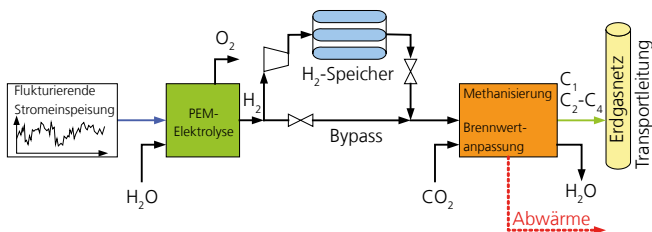
Die Architektur eines solchen Systems ist in Abb. 2 zu sehen. Sie sieht nach dem PEM-Elektrolyseur einen Wasserstoff-Speicher vor, weil im System ein Puffer vorgesehen werden muss, um die anschließende Methanisierung und Brennwertanpassung nicht allzu starken Lastschwankungen auszusetzen, weil chemische Anlagen nur in begrenztem Maße modulierend betrieben werden können.

Auf Basis dieses Fließbilds erstellten die Fraunhofer-Forscher ein Matlab/Simulink-Modell, welches das dynamische Verhalten

1 Druckelektrolysestack zur Charakterisierung des dynamischen Verhaltens unter fluktuierender Betriebsweise.

der einzelnen Systemkomponenten beschreibt. Eine Besonderheit solcher Energiespeichersysteme, die ins Erdgasnetz einspeisen, ist, dass sie von beiden Enden her beschränkt sind. Vor allem der Verlauf des eingespeisten Stroms, aber auch mögliche Begrenzungen bei der Einspeisung des erzeugten SNG in das Erdgasnetz spielen eine bedeutende Rolle bei der Ermittlung der optimalen Größe des Elektrolyseurs, des Wasserstoff-Zwischenspeichers und der Synthesen. Daneben müssen auch die Nutzung der Abwärme, des Sauerstoffs aus der Elektrolyse sowie die Quellen für das Kohlendioxid berücksichtigt werden.

Das Verbundprojekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt. Weitere Partner sind das Karlsruher Institut für Technologie (KIT), die DVGW-EBI und die Firmen EnBW, h-tec, IoLiTec und Outotec.



2 Blockfließbild eines Power-to-Gas Energiespeichersystems, das fluktuierenden Strom, z. B. aus regenerativen Quellen, in sog. Substitute Natural Gas (SNG) umwandelt, um es im Erdgasnetz zu speichern. Die elektrische Energie wird zunächst in Wasserstoff umgewandelt, der anschließend in einen Zwischenspeicher geht, um die sich anschließenden Synthesereaktoren (Methanisierung und Brennwertanpassung) mit einem nahezu gleichbleibenden Wasserstoffstrom versorgen zu können.





# RECYCLING VON $H_2$ , $SiCl_4$ UND $HCl$ BEI $Si$ -CVD-PROZESSEN

Zur Herstellung von polykristallinem Silicium wird Trichlorsilan ( $SiHCl_3$ ) mit Wasserstoff ( $H_2$ ) reduziert. Das Silicium fällt als Feststoff aus und ein Abgas entsteht, das neben bis zu 95 % Wasserstoff auch Tetrachlorsilan ( $SiCl_4$ ), Chlorwasserstoff ( $HCl$ ) und nicht umgesetztes Trichlorsilan enthält. Um diesen Prozess wirtschaftlich zu gestalten, müssen der Wasserstoff, der Chlorwasserstoff und die Chlorsilane aufgetrennt und dem Reaktor zugeführt werden. Da die bisherigen Lösungen erst bei Jahreskapazitäten von 10 000 Tonnen und mehr wirtschaftlich sind, ist eine Alternative wünschenswert. Eine Anwendung am Fraunhofer ISE ist eine CVD-Anlage.

Thomas Aicher, Stefan Reber, **Alexander Susdorf**, Christopher Hebling

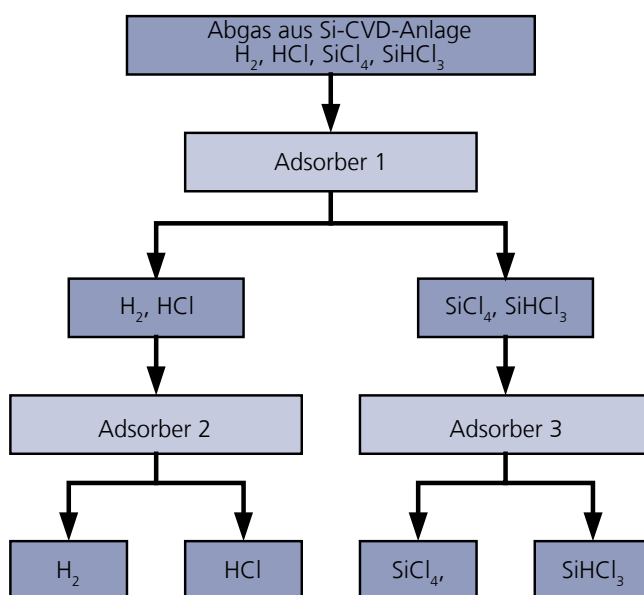
1 Vier der sechs Adsorber, zu sehen sind die Reaktoren mit Heizbändern und Thermoelementen (grün), noch ohne Wärmeisolierung.

Das Fraunhofer ISE hat ein neues Verfahren für das Recycling von Chlorsilanen, Wasserstoff und Chlorwasserstoff im Labor entwickelt. Bei diesem Verfahren werden diese Stoffe auf unterschiedlichen kommerziellen Adsorptionsmaterialien getrennt (Abb. 2).

Das Abgas wird zunächst über einen Adsorber 1 geleitet, dabei wird Tri- und Tetrachlorsilan adsorbiert. Das Abgas enthält nur noch Wasserstoff und Chlorwasserstoff und wird über einen Adsorber 2 geleitet, in dem selektiv der Chlorwasserstoff adsorbiert wird. Daher ist das Abgas aus Adsorber 2 reiner Wasserstoff, der wieder dem CVD-Prozess zugeführt werden kann. Bei der Regeneration des Adsorbers 1 werden die zuvor adsorbierten Stoffe Tri- und Tetrachlorsilan mit einem Trägergas thermisch desorbiert. Um diese Stoffe zu trennen, werden sie über einem dritten Adsorber 3 zugeführt. Dabei wird Trichlorsilan selektiv adsorbiert und vom Tetrachlorsilan abgetrennt. Bei der Regeneration des Adsorbers 3 kann reines Trichlorsilan und bei der Regeneration des Adsorbers 2 reiner Chlorwasserstoff gewonnen werden. Beide Stoffe können in die CVD-Anlage zurückgeführt werden.

Diese Verfahren zur kontinuierlichen Abtrennung der Chlorsilane und des Chlorwasserstoffs aus Wasserstoff wird derzeit in einer Pilotanlage erprobt.

Diese Arbeit wurde im Rahmen eines Eigenforschungsprojekts gefördert.



2 Prozess-Schema zur Auftrennung von Wasserstoff, Chlorsilanen und Chlorwasserstoff aus dem Abgas einer Si-CVD-Anlage.





## INBETRIEBNAHME EINER SOLAR GESTÜTZTEN 700 BAR-WASSERSTOFF-TANKSTELLE

Seit März 2012 betreibt das Fraunhofer ISE eine öffentlich zugängliche 700 bar-Wasserstoff-Tankstelle mit eigener Wasserstoffherzeugung durch fortschrittliche PEM-Elektrolyse. Zwei PV-Anlagen ergänzen den Strombedarf der Tankstelle und zeigen so die Möglichkeit einer nachhaltigen Wasserstoffherzeugung durch erneuerbare Energien auf. Die Tankstelle erlaubt eine normgerechte Schnellbetankung von 700 bar-Drucktanks innerhalb von drei bis fünf Minuten und kann damit von allen Wasserstoff-Fahrzeugen der neuesten Generation genutzt werden. Auch 350 bar-Drucktanks können befüllt werden. Zwei Brennstoffzellen-Fahrzeuge stehen dem Institut zur Verfügung und können im täglichen Einsatz die Alltagstauglichkeit der Technologie beweisen.

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

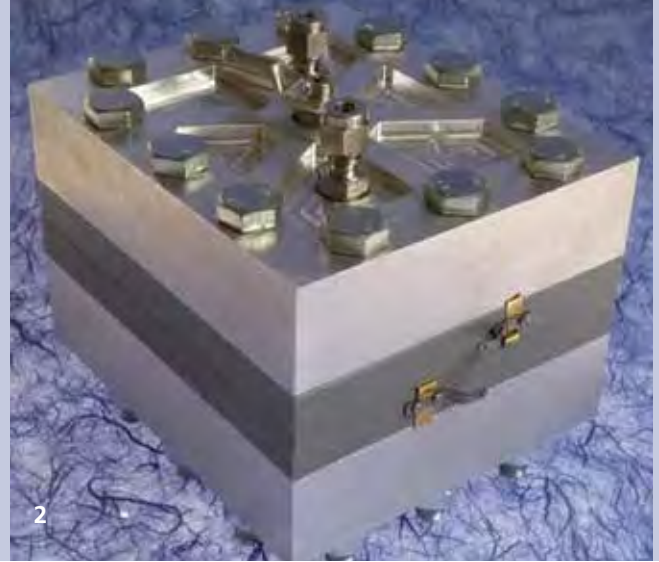
Die Tankstelle wurde in Containerbauweise realisiert. Im Elektrolysecontainer wird durch ein modernes Membranverfahren Wasserstoff bei 30 bar erzeugt und aufbereitet. Der zweite Container beinhaltet zwei Verdichter, die Wasserstoffvorkühlung sowie die Steuerungseinheit. Der Wasserstoff wird in der ersten Stufe auf 450 bar verdichtet und zwischengespeichert. Zur Schnellbetankung wird danach das Gas auf bis zu 950 bar komprimiert und in einem Hochdrucktank gelagert. Neben den beiden Dispenser-Einheiten zur automatischen Betankung für 350 und 700 bar Zieldruck wurde zusätzlich eine 200 bar/300 bar-Abfüllstation für Sonderanwendungen installiert.

- 1 700 bar-Wasserstoff-Tankstelle am Fraunhofer ISE mit einem der beiden Brennstoffzellen-Fahrzeuge, die dem Institut zur Verfügung stehen.
- 2 700 bar Füllstutzen zur Schnellbetankung von Brennstoffzellen-Fahrzeugen.

Neben ihrer eigentlichen Aufgabe, der Betankung von Wasserstoff-Fahrzeugen, bietet die Tankstelle weitere Möglichkeiten als Forschungs- und Technologieplattform. Sie verfügt über eine umfangreiche Messtechnik zum Monitoring der gesamten Anlage. Die Steuerung erlaubt eine flexible Betriebsführung. Einige Komponenten wurden so ausgelegt, dass jenseits der Wasserstoff-Mobilität weitere FuE-Vorhaben zum Test von Tankstellenkomponenten, zum Demand-Side-Management oder aus dem Bereich Power-to-Gas durchgeführt werden können.

Durch die günstige Lage Freiburgs integriert sich die Tankstelle ideal in das im Aufbau befindliche Netz an Wasserstoff-Tankstellen im Land und stellt für die Stadt einen wichtigen Eckstein zur nachhaltigen Mobilität dar.

Die Investition wurde durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg mit Mitteln aus dem Landesinfrastrukturprogramm unterstützt. Der Betrieb der Tankstelle wird durch das Nationale Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie teilweise gefördert.



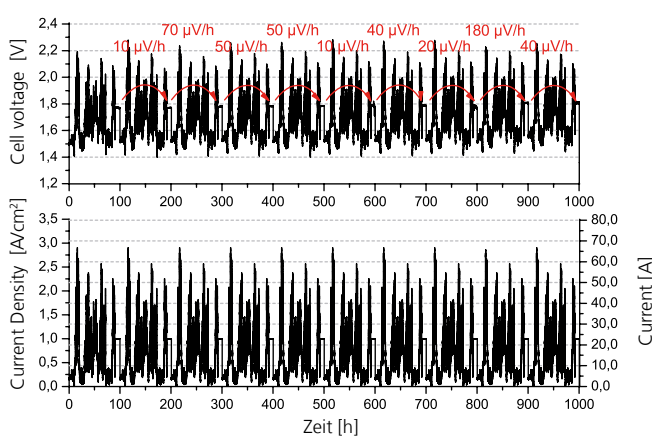
# NANOSTRUKTURIERTE ELEKTRODEN ZUR EFFIZIENTEN H<sub>2</sub>-PRODUKTION

Die Erzeugung von Wasserstoff aus erneuerbaren Energien durch Elektrolyse ist eine wichtige Schlüsseltechnologie zur Speicherung großer Energiemengen. PEM-Elektrolyseure, die mit einem sauren Festelektrolyten arbeiten, eignen sich besonders zur Kopplung mit erneuerbaren Energien. Sie besitzen eine sehr schnelle Dynamik, einen sehr großen Teil- und Überlastbereich und ein einfaches Systemlayout. Allerdings müssen Edelmetalle als Katalysatoren für das saure Milieu eingesetzt werden. Durch den Einsatz nanostrukturierter Elektroden können kinetische Verluste und die Beladung der Edelmetallkatalysatoren minimiert werden. Ein Schwerpunkt unserer Arbeiten ist die Untersuchung des Langzeitverhaltens und die Identifikation wichtiger Degradationseffekte neuentwickelter Elektroden.

1 50 bar-Druckelektrolyseteststand für PEM-Elektrolyse-Laborzellen.

2 25 cm<sup>2</sup>-Laborzelle mit integrierten Referenzelektroden zur Messung anodischer und kathodischer Überspannungen.

Sebastian Rau, Tom Smolinka, Christopher Hebling



3 Galvanostatische Dauermessung einer PEM-Elektrolysezelle mit nanostrukturierten Elektroden über 1000 h (Simulation des Leistungsprofils einer Windkraftanlage). Die roten Werte geben die Degradation der Zelle in Mikrovolt pro Stunde an.

Ein vorrangiges Ziel in der aktuellen Elektrodenentwicklung ist die Reduzierung der Edelmetallbeladung bei gleichzeitig hoher Robustheit der Elektroden. Ein Ansatz sind geträgerte Katalysatorsysteme, auf denen zielgerichtet Nanopartikel von Edelmetallen aufgebracht werden. Vor allem Niob-dotiertes Titandioxid ist ein geeigneter Katalysatorträger für die PEM-Elektrolyse. Zusammen mit unserem Partner, der University of South Carolina (Arbeitsgruppe von Prof. John Weidner), haben wir verschiedene Elektroden auf Basis von Iridium-Ruthenium und deren Oxiden entwickelt. In Langzeitmessungen mit dynamischen Leistungsprofilen untersuchen wir deren Stabilität (Abb. 3). Dabei wird eine am Institut entwickelte Testzelle eingesetzt, die es erlaubt, Überspannungen der Anode und Kathode getrennt zu messen.

Die Arbeiten wurden durch die E.ON International Research Initiative gefördert.



1

## BETRIEBSERFAHRUNGEN MIT BRENNSTOFFZELLENFAHRZEUGEN

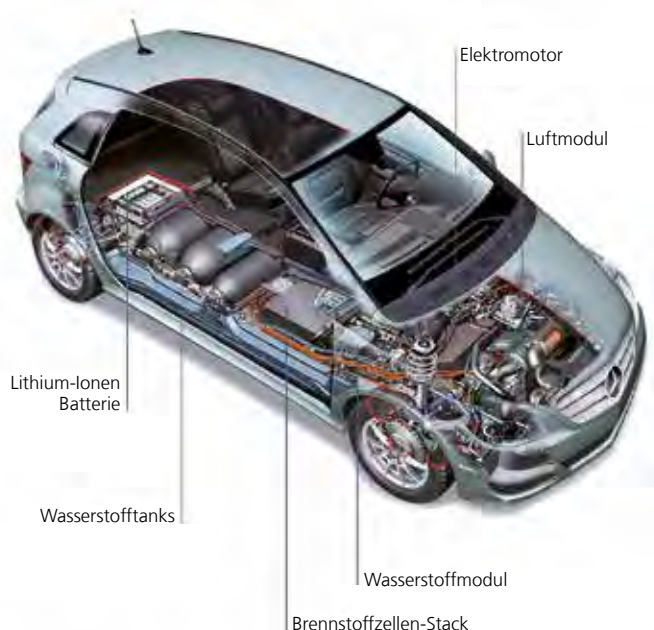
Im Zuge der Eröffnung der Solaren Wasserstofftankstelle betreibt das Fraunhofer ISE seit März 2012 zwei Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzellenantrieb. Gemeinsam haben sie bisher eine Fahrleistung von mehr als 10 000 km erbracht. Basis des F-Cell genannten Vorserienfahrzeugs ist eine B-Klasse Baureihe T 245 von Daimler. Wesentliche Fahrwerte werden in einem speziellen Fahrtenbuch dokumentiert und erlauben die Analyse der realisierbaren Reichweite. Für beide Fahrzeuge liegen die ermittelten Durchschnittsverbräuche bei 1,3 bzw. 1,24 kg H<sub>2</sub> / 100 km, entsprechend einer Reichweite von ca. 280 km. Eine Fahrt von Freiburg nach Stuttgart ist mit einer F-Cell genauso schnell und komfortabel möglich wie gewohnt.

**Thomas Jungmann**, Stefan Keller, Christopher Hebling

Elektrofahrzeuge, die Strom aus einer Brennstoffzelle zur Verfügung stellen, ermöglichen eine größere Reichweite im Vergleich zu rein batterieelektrisch angetriebenen Fahrzeugen und können innerhalb von drei Minuten betankt werden. Moderne Brennstoffzellenfahrzeuge sind kaltstartfähig bis unter -20 °C und weisen dabei keinen Reichweitenverlust auf. Die F-Cell beschleunigt mithilfe des 100 kW starken Elektromotors bis auf eine Höchstgeschwindigkeit von 170 km / h. Die F-Cell ist ein Hybridfahrzeug mit einer 1,4 kWh Lithium-Ionen Batterie.

Im neuen europäischen Fahrzyklus liegt der Wasserstoffverbrauch der F-Cell bei 0,97 kg H<sub>2</sub> / 100 km. Zusammen mit dem 3,7 kg Wasserstoff fassenden Tanksystem ergibt sich eine rechnerische Reichweite von 385 km. Dabei müssen die Insassen auf keinen Komfort verzichten, sowohl das Raumangebot als auch die Ausstattung entsprechen denen der vergleichbaren Verbrennungsmotorfahrzeuge.

1 Auf Tempo 100 km / h beschleunigt die B-Klasse in 11,4 Sekunden.



2 Schnittdarstellung der F-Cell. © Daimler

Bei Fahrten über Land und speziell auf der Autobahn zeigt sich ein im Vergleich zu den Herstellerangaben oft höherer Verbrauch. Über alle Durchschnittsverbräuche der Fahrten hinweg ergibt sich eine Spannweite von 0,93–2,01 kg H<sub>2</sub> pro 100 km. Die längste Fahrt mit einer Tankfüllung betrug 291 km, am Ende befanden sich noch 300 g Wasserstoff im Tank. Prinzipiell ist die Verbrauchszunahme bei zunehmender Geschwindigkeit höher als bei konventionellen Fahrzeugen. Da Brennstoffzellen auch im Teillastbereich eine sehr hohe Effizienz aufweisen, ist jedoch das Verbrauchsäquivalent deutlich unterhalb konventioneller Fahrzeuge.



**QUALITÄT SETZT SICH DURCH**





# SERVICEBEREICHE

In Ergänzung zu unserer Forschung und Entwicklung bieten wir Kunden Prüf- und Zertifizierungsverfahren an. Derzeit verfügt das Fraunhofer ISE über vier akkreditierte Testeinrichtungen: TestLab Solar Thermal Systems, TestLab Solar Façades, TestLab PV Modules und das Kalibrierlabor mit dem CalLab PV Cells und CalLab PV Modules. Zu unseren weiteren Servicebereichen zählen ein Batterie-Prüflabor, ein Wechselrichterlabor, ein Lichtlabor, 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. Desweiteren haben wir am Fraunhofer ISE 2012 damit begonnen, ein Entwicklungs- und Prüfzentrum für Systeme zur Wärmetransformation aufzubauen. Dort können in Zukunft elektrisch wie thermisch angetriebene Wärmepumpen vermessen und weiterentwickelt werden.

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

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

- Solarluftkollektorteststand
- Hagelschlagteststand
- System- und Speicherteststand
- Außenteststand mit Trackern und dynamischem Rack
- Innenteststand mit Solarsimulator (max. Aperturfläche 3 x 3,5 m<sup>2</sup>)
- Kollektorteststand bis 200 °C
- 5 x 3 m<sup>2</sup> großer mechanischer Lastteststand in Klimakammer

Am TestLab Solar Thermal Systems werden in erster Linie Industrieaufträge zur Prüfung von Kollektoren nach europäischen und internationalen Kollektor-, System-, Speichernormen für Qualitätslabel, z. B. das »Solar Keymark« des CEN, durchgeführt. Einzigartig ist die Möglichkeit der mechanischen Lastprüfung bei Temperaturen von -40 °C bis 90 °C (s. S. 141).

Das TestLab Solar Façades erhielt die Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 im Jahr 2006. Es bietet Entwicklern, Herstellern und Planern von Fassaden(-komponenten) und Fenstern, einschließlich Sonnenschutz, ein umfassendes Dienstleistungsangebot zur Charakterisierung von innovativen Bauteilen oder Materialien. Das Leistungsspektrum umfasst insbesondere die Charakterisierung von Komponenten, die auch zur aktiven Solarenergienutzung dienen (transparente Fassadenkollektoren und BIPV). Neben den akkreditierten Prüfungen werden umfangreiche Dienstleistungen zum Thema Blendschutz und Tageslichtversorgung angeboten (s. S. 142).

Geprüft werden im Rahmen der Akkreditierung: g-Wert (auch kalorimetrisch), Transmissionsgrad (spektral und integral), Reflexionsgrad (spektral und integral) und U-Wert.

Das TestLab PV Modules besitzt seit 2006 die Akkreditierung für die Bauartzulassung von PV-Modulen gemäß IEC 61215 und IEC 61646 sowie seit 2011 für die Sicherheitsnorm IEC 61730. Ziel der Testeinrichtung ist die Qualitätssicherung der Zuverlässigkeit von PV-Modulen. Im Rahmen der Kooperation mit dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut übernimmt das Fraunhofer ISE alle Performance-Prüfungen, das VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut stellt nach erfolgreicher Prüfung die Zertifikate aus. Neben den Prüfungen für die Bauartzertifizierung werden entwicklungsbegleitende Prüfungen für Module und Modulkomponenten nach Anforderungen der Hersteller durchgeführt. Das TestLab PV Modules arbeitet dabei eng mit dem Kalibrierlabor am Fraunhofer ISE – CalLab PV Cells und CalLab PV Modules – zusammen (s. S. 138/139).

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

ANSPRECHPARTNER

**CallLab PV Cells**

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

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



Das Fraunhofer ISE hat 2012 einen neuen Prüfstand für solarthermische Kollektoren in Betrieb genommen. Mit diesem können die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unter extremen klimatischen Bedingungen mechanische Lasten, z. B. Windeinwirkung oder Schneelasten, simulieren und deren Auswirkungen auf die Kollektoren auswerten. Für die Untersuchung der Stabilität und Sicherheit der solarthermischen Kollektoren bei Wind- und Schneelasten ist der Prüfstand in eine Klimakammer eingebettet (s. S. 51).

<b>Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken</b>	Dr. Christian Reise	Telefon +49 761 4588-5282 christian.reise@ise.fraunhofer.de
<b>Photovoltaik Leistungselektronik</b>	Prof. Dr. Bruno Burger Charakterisierung von Wechselrichtern	Telefon +49 761 4588-5237 bruno.burger@ise.fraunhofer.de
<b>Wechselrichterlabor</b>	Dipl.-Ing. Sönke Rogalla	Telefon +49 761 4588-5454 soenke.rogalla@ise.fraunhofer.de
<b>Batterie-Prüflabor</b>	Dipl.-Ing. Stephan Lux	Telefon +49 761 4588-5419 stephan.lux@ise.fraunhofer.de
<b>Lichtlabor</b>	Dipl.-Ing. (FH) Norbert Pfanner	Telefon +49 761 4588-5224 norbert.pfanner@ise.fraunhofer.de
<b>Lüftungsgeräte und Wärmepumpen</b>	Dipl.-Ing. Thore Oltersdorf Prüfstand	Telefon +49 761 4588-5239 thore.oldersdorf@ise.fraunhofer.de
<b>Wärmetransformation</b>	Dr.-Ing. Lena Schnabel	Telefon +49 761 4588-5412 lena.schnabel@ise.fraunhofer.de
<b>PCM-Labor</b>	Dipl.-Ing. (FH) Thomas Haussmann	Telefon +49 761 4588-5351 thomas.haussmann@ise.fraunhofer.de
<b>Prüflabor für Adsorptionsmaterialien und poröse Materialien</b>	Dr. Stefan Henninger	Telefon +49 761 4588-5104 stefan.henninger@ise.fraunhofer.de
<b>Testzentrum Brennstoffzelle</b>	Dipl.-Ing. Ulf Groos	Telefon +49 761 4588-5202 ulf.groos@ise.fraunhofer.de



## KALIBRIEREN VON SOLARZELLEN NACH INTERNATIONALEN STANDARDS

**Das Callab PV Cells bietet die Messung/Kalibrierung von Solarzellen verschiedenster PV-Technologien an und arbeitet national und international mit Firmen und Instituten an der Entwicklung präziser Messungen für neue Technologien. Das Callab PV Cells zählt zu den weltweit führenden PV-Kalibrierlabors. Es 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 Hultsch, 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. Im Zuge der Vereinheitlichung der Kalibrierung in Europa wird die Akkreditierung derzeit auf die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS), der deutschen Unterzeichnerorganisation des »ILAC Mutual Recognition Arrangement (MRA)« übertragen. 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 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 rege nachgefragt. Das Besondere bei unserem Verfahren ist die Messung der temperaturabhängigen spektralen Empfindlichkeit. Diese und weitere Spezialmessungen setzen wir seit diesem Jahr in einem vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und

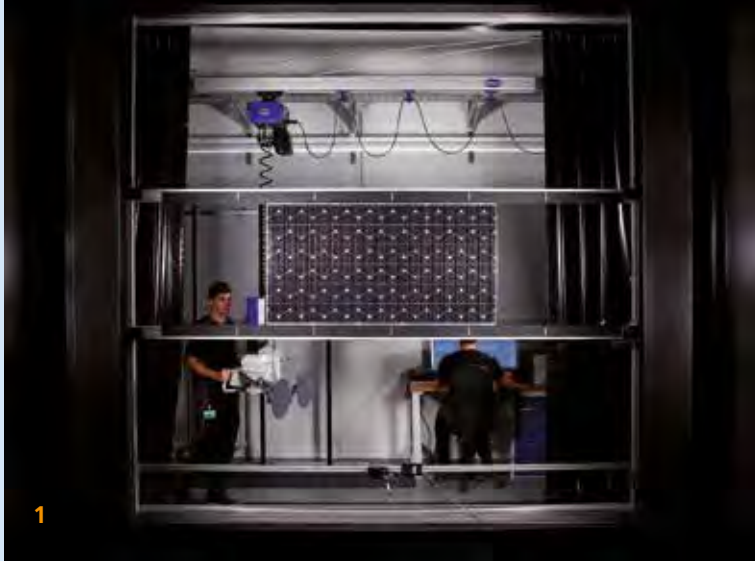
**1** *Spektrale Empfindlichkeiten werden auch an großflächigen Solarzellen mit hoher Genauigkeit und mit exakter Angabe der Messunsicherheiten bestimmt.*

Reaktorsicherheit (BMU) geförderten Projekt zur Optimierung des maximalen Jahresertrags von Hocheffizienzsolarzellen ein.

Um die Vergleichbarkeit von verschiedenen Solarzellentechnologien zu gewährleisten, arbeiten wir weiter an der Entwicklung von Messverfahren für neuartige Solarzellen. Wichtig sind hier vor allem einseitig kontaktierte sowie bifaciale Strukturen. Aber auch organische und Dünnschicht-Solarzellentechnologien, und hier wiederum die Mehrfachzellstrukturen, stellen eine besondere Herausforderung dar. Dabei können wir vorteilhaft unsere Erfahrungen mit der Kalibrierung von Mehrfachsolarzellen für Weltraum- und terrestrische Konzentrationen einbringen. Mit der Erweiterung unserer Kalibriermöglichkeiten von Mehrfachzellen aus Dünnschichtmaterialien konnten wir die Technologieentwicklung noch besser durch präzise Messungen unterstützen. Die spektrale Empfindlichkeit bzw. externe Quanteneffizienz von Mehrfachsolarzellen wird an unserem Gittermonochromatormessplatz bestimmt, der speziell für die Vermessung von Mehrfachsolarzellen erweitert wurde. Die Strom-Spannungskennlinie von Zweifach- und Dreifachsolarzellen messen wir mit unserem Dreilichtquellen-simulator unter nahezu beliebigen Normbedingungen, z. B. AM0 (ISO 15387) für Weltraum- und AM1.5d (ASTM G173-03) für Konzentrationen. Konzentrationssolarzellen 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.

[www.callab.de](http://www.callab.de)





## KALIBRIEREN VON PV- UND CPV-MODULEN

**Seit über 25 Jahren zählt das akkreditierte Kalibrierlabor Callab PV Modules zu den weltweit führenden Laboren. Mit einer Messunsicherheit von 1,8 % für Solarmodule mit kristallinen Zellen konnte diese Spitzenstellung im internationalen Vergleich nun weiter ausgebaut werden.**

Daniela Dirnberger, Boris Farnung, Martin Jantsch, Klaus Kiefer, Ulli Kräling, **Frank Neuberger**, Michael Schachtner, **Gerald Siefer**

Das Callab PV Modules hat seine Genauigkeit bei der Präzisionsmessung von Solarmodulen erneut gesteigert. Die weltweit einmalige Messunsicherheit von 1,8 Prozent nützt vor allem den Modulherstellern. Die sehr geringen Messtoleranzen bei der Kalibrierung der Referenzmodule für die Produktionslinien sorgen für eine höhere Sicherheit bei der Ausweisung der Nennleistung und der Toleranzen.

Für die Bewertung des Ertrags von PV-Modulen sind neben der Leistung weitere Eigenschaften wie Anfangsdegradation, Schwachlichtverhalten und Temperaturabhängigkeit wichtig. Die präzise Messung dieser Einflussfaktoren ermöglicht genaue Ertragssimulationen für verschiedene Klimazonen und liefert für Investoren ein Benchmarking als Entscheidungshilfe für die Auswahl des Herstellers.

Zur Überprüfung der Modulleistung bei großen PV-Kraftwerken haben wir ein Verfahren zur repräsentativen Stichprobenziehung entwickelt. Dieses bietet dem Investor schon bei Messung von 10–50 Modulen eine belastbare Aussage zur tatsächlichen Modulleistung.

1 *Präzise Kalibrierung eines PV-Moduls im Callab PV Modules.*

2 *Justage eines CPV-Moduls am Labormessplatz für Konzentratormodule.*

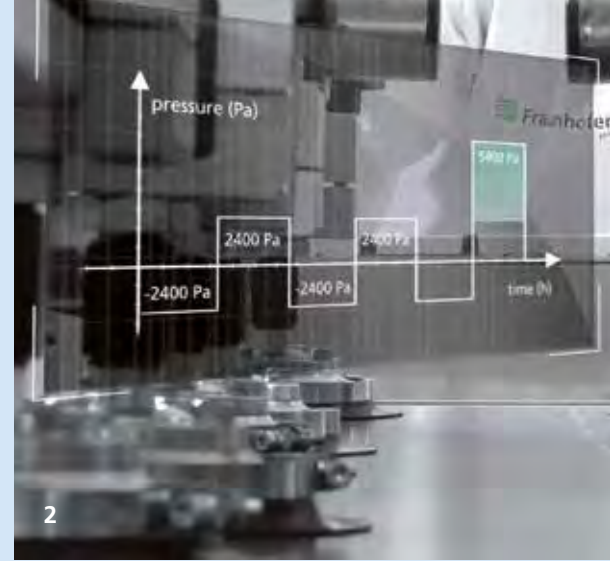
### Vermessung von Konzentratormodulen

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. Zusätzlich 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](http://www.callab.de)



1



2

## TESTLAB PV MODULES

**Das TestLab PV Modules bietet ein weites Spektrum an Dienstleistungen rund um Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprüfungen an. In unserem nach ISO 17025 akkreditierten Labor betreiben wir modernste und innovative Prüfanlagen. Nicht zuletzt durch unsere langjährige wissenschaftliche Erfahrung im Bereich der Gebrauchsdauersanalyse sind wir unseren Kunden ein kompetenter und unabhängiger Ansprechpartner.**

Stefan Ali, Holger Ambrosi, Heinrich Berg, Ilie Cretu,  
**Claudio Ferrara**, Philipp Hog, Georg Mülhoyer,  
**Daniel Philipp**, Sandor Stecklum, Carola Völker,  
 Jeanette Wolf

Das TestLab PV Modules wurde 2006 als Servicebereich des Fraunhofer ISE gegründet. In Zusammenarbeit mit der Gruppe Gebrauchsdauerprüfung entwickeln wir Tests und Verfahren zur Sicherstellung von Qualität und Zuverlässigkeit von PV-Modulen. Hierfür verwenden wir innovative Anlagen, deren Anwendungsbereich deutlich über die Standardprüfungen hinausgeht. Dadurch können wir Degradationsfaktoren sehr real simulieren. Unser Fokus liegt auf den folgenden Dienstleistungsangeboten:

### **Beratung und Durchführung von kunden- und anwendungsspezifischen Prüfungen**

Individuelle Fragen erfordern individuelle Antworten. In diesem Sinne bieten wir unseren Kunden kompetente, zielgerichtete Dienstleistungen an. Unabhängig davon, ob es um vergleichende Modulprüfungen (Benchmarking) oder um die Qualifizierung einer speziellen Modultechnologie für besondere Einsatzbedingungen geht, das Erarbeiten individueller und kosteneffizienter Kundenlösungen hat im TestLab PV Modules stets höchste Priorität.

**1** In der kombinierten UV- und Feuchte-Wärme-Klimakammer können PV-Module bei einer maximalen UV-Dosis von 200 W/m<sup>2</sup>, einer maximalen Feuchte von 60 % r. F. und einer maximalen Temperatur von 90 °C gealtert werden. Über die Standardanforderungen hinaus kann somit das gleichzeitige Einwirken mehrerer Degradationsfaktoren simuliert werden.

**2** Der mechanische Lasttest erlaubt sowohl die automatisierte Durchführung von IEC-konformen Prüfungen als auch von Prüfungen, die darüber hinausgehen (maximale Druck- und Sogleistung 10 kPa, max. Frequenz: 0,2 Hz).

### **Beurteilung und Analyse von Fehlerbildern, Risikominimierung**

Potential Induced Degradation (PID), sogenannte Schnecken-spuren und Yellowing sind nur einige typische Fehlerbilder, mit denen Kunden häufig an uns herantreten. Wir bieten die Möglichkeit, diese und andere Fehlerbilder systematisch zu analysieren sowie Ursachen und Auswirkungen zu identifizieren. Unser Ziel ist es, das Auftreten derartiger Fehler insgesamt zu verringern. Daher bietet das TestLab PV Modules für viele typische Fehlerbilder zielgerichtete Prüfungen und Prüfsequenzen an.

### **Qualitätsprüfungen nach internationalen Standards**

In enger Kooperation mit unserem Partner, dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut, führen wir Zertifizierungen entsprechend internationaler Qualitäts- und Sicherheitsstandards (IEC 61215, IEC 61646, IEC 61730) durch. In internationalen Arbeitsgruppen setzen wir uns für die Weiterentwicklung dieser Standards ein.



## 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, Arim Schäfer, Christian Schmidt, Christoph Thoma, Jasmin Vesper

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. 2012 wurde unser großer Prüfstand für mechanische Lasten fertig gestellt. Dieser ist in eine Klimakammer integriert, was das Testen von unterschiedlichsten Lastfällen bei gleichzeitig eingestellter Umgebungstemperatur (-40 °C bis 90 °C) ermöglicht (s. Beitrag S. 51). Die Besonderheiten sind dabei die große Prüffläche mit 3 m x 5 m, die möglichen hohen Lasten mit bis zu 10 t sowie die Abbildung von verschiedenen Lastfällen, z. B. wechselnde Belastung, gradierte Lasten, Schublasten.

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 technische Charakterisierung ähnlich wie für flüssigkeitsführende Kollektoren ist möglich. Hier wurde außerdem eine Erweiterung der Testmöglichkeiten für unabgedeckte Luftkollektoren realisiert.

*1 Großer mechanischer Lastprüfstand integriert in eine Klimakammer für umfangreiche Tests bei Temperaturen von -40 °C bis 90 °C.*

*2 Wissenschaftler des Fraunhofer ISE beim Aufbau eines Speichertests, um die Leistungsperformance für die Bewertung nach dem Energy Label der EU zu bestimmen.*

Systemuntersuchungen, insbesondere auch Speichervermessung nach DIN EN 12977-3,4 können in unserem System- und Speicherlabor durchgeführt werden. Hier werden auch die notwendigen Kennzahlen zur Bewertung von Speichern nach dem Energy Label der EU ermittelt, das 2013 eingeführt wird.

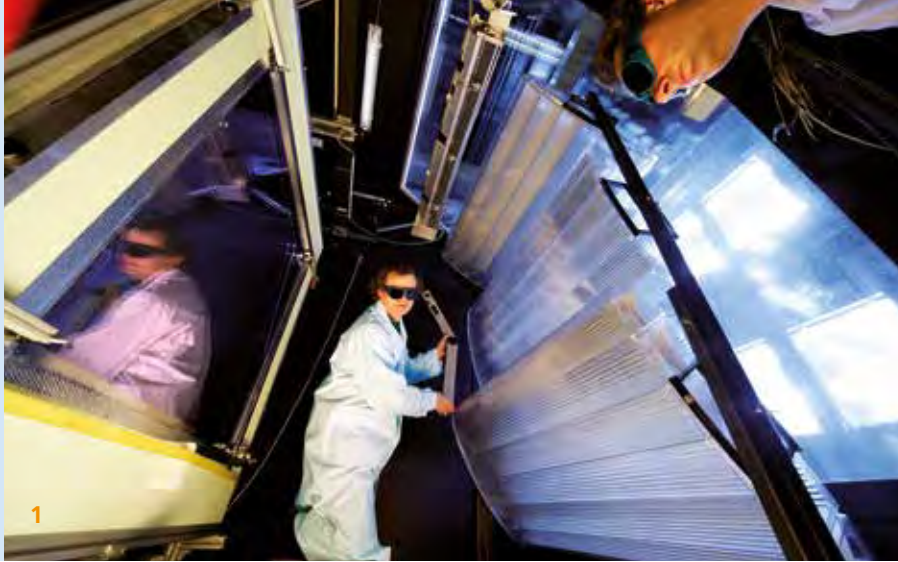
Seit 2002 betreiben wir im TestLab Solar Thermal Systems einen Solarsimulator. Hier konnten wir 2012 eine weitergehende Automatisierung des Laborbetriebs umsetzen, welche die gewohnt hohe Wiederholgenauigkeit noch unkomplizierter erreichen lässt.

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 Prozesswärmekollektoren (z. B. für solarthermisch angetriebene Klimatisierung) möglich.

2012 konnten auch in der Normungsarbeit, die von unseren Mitarbeitern geleistet wird, viele methodische Weiterentwicklungen umgesetzt werden, die sich in neuen Normen wiederfinden werden.

[www.kollektortest.de](http://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 – bieten wir eine durchgehende Qualitätsbewertung von der Planung bis zum laufenden Betrieb von PV-Kraftwerken:

- Bereits in der Planungsphase einer PV-Anlage setzen unsere qualitätssichernden Leistungen an. Unsere unabhängigen Ertragsgutachten liefern genaue Aussagen über sämtliche Einflussparameter auf den Ertrag sowie deren Unsicherheiten.
- Damit unsere Kunden sicher sein können, dass ihr Kraftwerk auch wirklich dem Stand der Technik entspricht und die versprochene Leistung bringt, bieten wir eine umfangreiche Vollprüfung des gesamten Kraftwerks an. Hat eine PV-Anlage den Betrieb aufgenommen, gibt eine 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.

Laura Hardt, Klaus Kiefer, Anselm Kröger-Vodde,  
**Christian Reise**, Andreas Steinhüser

1 10 MWp Solarkraftwerk in Masdar, Abu Dhabi.



## Batterie-Prüflabor

Wir prüfen Batterien und Systeme auf der Basis von z. B. Blei, NiCd, NiMH, Li-Ionen-Zellen, Redox-Flow- sowie Hochtemperaturbatterien und Doppelschichtkondensatoren. Es sind Batterietestsysteme und Impedanzspektrometer vorhanden, mit denen nach Norm oder nach Kundenanforderung in der Klimakammer oder im Wasserbad getestet wird.

### Langzeittests

Für Lebensdauertests von Batterien und Batteriesystemen bieten wir auch mehrmonatige Langzeittests an.

### Automotive-Bereich

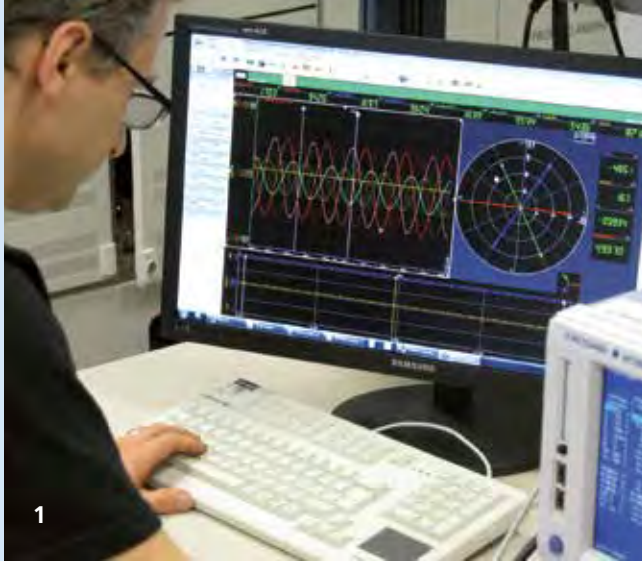
Wir testen Systeme bis zu 250 kW bei Strömen bis zu 600 A und Spannungen bis zu 1000 V und können die Systeme über CAN-Bus ansteuern.

### Stationäre Solarspeicher

Die dezentrale Speicherung elektrischer Energie in Batteriesystemen wird immer wichtiger. Wir testen mit Solarsimulatoren, Dieselgeneratoren und unserer modernen Ausstattung an Wechselrichtern und Laderegler elektrische Speichersysteme in einer realitätsnahen Umgebung.

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

2 Batteriespeicher, z. B. für den Automotive-Bereich, können bei Leistungen bis zu 250 kW getestet werden.



1

## Wechselrichterlabor

Unser Megawattlabor bietet alle notwendigen Einrichtungen für die Prüfung von Zentralwechselrichtern bis zu einer Leistung von 1 MW nach diversen Netzeinspeiserichtlinien. Eine mittelspannungsseitige »Low Voltage Ride Through«-Prüfeinrichtung erlaubt es uns, das Verhalten von Wechselrichtern während kurzzeitiger Netzfehler zu untersuchen. Mit unserer hochpräzisen Messtechnik können zudem sowohl der Umwandlungs- als auch der Anpassungswirkungsgrad (MPPT-Verhalten) zuverlässig bestimmt werden.

Dank internationaler Kooperationen sind wir in der Lage, bei Fragestellungen zu nationalen (BDEW) wie auch internationalen Richtlinien (China, Spanien etc.) Unterstützung zu leisten. Zudem können wir unseren Kunden umfangreiche Simulationsdienstleistungen sowohl für die Einheiten- und Anlagenzertifizierung als auch zu spezifischen Problemen in PV-Parks anbieten.

Bruno Burger, Robin Grab, **Sönke Rogalla**

1 Unsere Ausstattung und unser erfahrenes Personal ermöglichen eine detaillierte Analyse von Wechselrichtern bis 1 MW hinsichtlich Performance und Verhalten am Netz.



2

## Lichtlabor

### Charakterisierung

Wir führen präzise Messungen lichttechnischer Größen an LED- und Leuchtstofflampen, Leuchten und Beleuchtungssystemen durch, z. B. Messung des Lichtstroms, der Lichtausbeute und der Beleuchtungsstärkeverteilung, sowie das lichttechnische Betriebs- und Langzeitverhalten unter verschiedenen Umgebungsbedingungen. 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
- softwaregesteuertes Spektrometer zur automatisierten Messung der spektralen Lichtverteilung, der Lichtfarbe und der Farbwiedergabe
- Leuchtdichtekamera, Luxmeter und Langzeitteststände
- breitbandige, präzise Wattmeter, Digitaloszilloskope
- programmierbare, langzeitstabile Stromversorgungen

Georg Bopp, **Norbert Pfanner**, Matthias Vetter

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



## SmartEnergyLab – thermisch- elektrische Gebäudeenergiesysteme

Die zunehmend wirtschaftlichen dezentralen Erzeuger erobern unsere Wohngebäude und erzeugen Energie dort, wo sie verbraucht wird. Veränderungen in der Förderstruktur führen zu neuen Betriebsstrategien, von der reinen Volleinspeisung hin zur Eigenversorgung mit lokalen Regelungskonzepten.

Das SmartEnergyLab verfügt über eine vollständige Ausstattung von dezentralen Erzeugungstechnologien und Speichern zukünftiger Wohngebäude. Das Labor arbeitet mit einem leistungsfähigen Simulationsrechner, der den modellbasierten »Hardware-in-the-Loop«-Betrieb ermöglicht. So können beliebige dynamische Szenarien für Last und Erzeugung im häuslichen Kontext aufgeprägt werden.

Die Infrastruktur des SmartEnergyLab erlaubt es, Systemanbietern sowohl ihre Einzelsysteme als auch Gesamtkonzepte in einer realitätsnahen Umgebung zu testen und zu evaluieren. Diese Analysen beinhalten z. B. Effizienzbewertungen sowie die Bewertung und Entwicklung von Energiemanagement-Gateways oder lokalen Regelungskonzepten.

**Bernhard Wille-Haußmann**, Christof Wittwer



## Teststand für Wärmepumpen

Für die Prüfung von Wärmepumpen steht uns ein Teststand zur Verfügung, um die wichtigsten Formen von Quellen und Senken (Erdrich, Grundwasser, Luft) zu simulieren (Hardware-in-the-Loop). Dabei wird ein Heizleistungsbereich von 4 kW bis zu 12 kW abgedeckt. Die Vermessung erfolgt gemäß EN 14511 und EN 14825 für den Heizfall und nach EN 16147 für den Warmwasserbetrieb. Bei den luftbeaufschlagten Anlagen können derzeit nur Wärmepumpen in Kanalbauweise vermessen werden. Der Verdampferteststand orientiert sich an den Vorgaben aus der EN 328, dient aber vor allem der Neuentwicklung von Verdampfern. Die Erweiterung des prüfbaren Leistungsbereichs und die Erweiterung zur Abdeckung aller gängigen Wärmepumpentypen werden 2013 abgeschlossen sein. Eine Akkreditierung nach ISO/IEC 17025 und Registrierung als offizielles Prüfzentrum für das EHPA-Gütesiegel wird in diesem Zusammenhang angestrebt.

Simon Braungardt, Sebastian Helmling, Thomas Kramer, Marek Miara, **Thore Oltersdorf**, Christian Sonner, Jeannette Wapler

1 Leitrechner im SmartEnergyLab.

2 Vermessung einer Sole-Wasser-Wärmepumpe kleiner Leistung.



## Prüfung und Entwicklung von Wärmeübertragern

Zur Bewertung von Wärmeübertragern stehen verschiedene Prüfstände zur Verfügung:

- Luft-/Wasser-Wärmeübertrager (Luft: 10–1200 m<sup>3</sup>/h bei definierter Eintrittsfeuchte und -temperatur, Wasser: 60–1800 l/h bei definierter Eintrittstemperatur)
- Luft-/Luft-Wärmeübertrager (150–500 m<sup>3</sup>/h bei definierter Eintrittsfeuchte und -temperatur, auch für offene Sorption geeignet)
- Verdampfer (für die Arbeitsmittel Wasser und Kohlenwasserstoffe) und Adsorber (nur Wasser) (Verdampfungsleistung bis 2,5 kW, Adsorptionskapazität bis 8 kg)

Die Sensorik der Prüfstände erlaubt die Bestimmung der Übertragungsleistung, des Wärmedurchgangs und der Wärmeübergangskoeffizienten. Die experimentelle Expertise wird ergänzt durch die simulationsbasierte Bewertung. Hier werden je nach Fragestellung Werkzeuge wie COMSOL Multiphysics, OpenFoam, CoilDesigner, IMST-ART, Modelica oder eigene Software verwendet.

Zur Untersuchung der Strömungscharakteristik, der Fluid- und Temperaturverteilung sowie der Wärme- und Stofftransportdynamik sind weitere Prüf- und Simulationsverfahren vorhanden, die für charakteristische Elemente eines Wärmeübertragers die Identifikation der relevanten Einflussgrößen ermöglichen.

Gerrit Földner, Michael Herrmann, Alexander Morgenstern, Thore Oltersdorf, **Lena Schnabel**, Peter Schossig, Ursula Wittstadt

**1** Prüfstand zur Vermessung der Adsorptionskapazität und -dynamik von Adsorptionswärmeübertragern.



## PCM-Labor: Charakterisierung von Latentwärmespeichermaterialien

Im PCM-Labor (PCM = Phase Change Materials) werden Latentwärmespeichermaterialien, -verbünde, -objekte und -systeme gemäß den Prüfkriterien nach RAL GZ 869 vermessen. Das Labor ist zugelassene Zertifizierungsstelle für dieses Gütezeichen.

Außerdem stehen Messgeräte für folgende Materialparameter zur Verfügung:

- Wärmeleitfähigkeit und U-Wert von Baustoffen und Wandaufbauten
- spezifische und latente Wärmespeicherkapazität, Nukleationstemperatur und Unterkühlung mittels Calvet- und Heatflux-Differentialkalorimetern
- Zyklierungsapparaturen
- adiabater Testraum entsprechend DIN EN 14240 zur statischen und dynamischen Vermessung von Heiz- und Kühlsystemen
- Testräume mit Außenbezug zur Vermessung von PCM-Systemen
- speziell für Phasenwechselfluide PCS-Aufbauten zur Materialcharakterisierung:
  - Dichte
  - Wärmeleitfähigkeit
  - Partikelgrößen
  - Viskosität
  - Stabilitätsanalyse
- Teststände zur Herstellung, Charakterisierung und Zyklisierung von Emulsionen

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

**2** Calvet DSC zur thermischen Charakterisierung von Latentwärmespeichermaterialien.





## Prüflabor für poröse Materialien und Werkstoffe

Die Labore für Thermo- und Strukturanalytik bieten ein breites Spektrum an Analysemöglichkeiten rund um die Materialentwicklung und zu Fragestellungen bezüglich Oberfläche, Porenstruktur und Porosität, Adsorptionscharakteristik bezüglich verschiedener Gase sowie der Morphologie von porösen Materialien und Werkstoffen.

Unsere Möglichkeiten umfassen hierbei isotherme Gassorptionsmessungen mit verschiedenen Prüfgasen ( $N_2$ ,  $CO_2$ , EtOH, MeOH,  $H_2O$ ) zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche, des Porenvolumens und der Porengrößenverteilung sowie der gesamten Adsorptionscharakteristik mit volumetrischen Methoden.

Zusätzlich stehen für die Messgase  $H_2O$ , EtOH und MeOH auch thermogravimetrische Methoden, d. h. Bestimmung der Adsorptivaufnahme in Abhängigkeit von Druck und Temperatur durch Isobaren oder Isothermen, zur Verfügung. Geräte zur Makroporencharakterisierung durch Quecksilberintrusion sowie zur Dichtebestimmung durch Helium-Pyknometrie runden das Profil ab.

Im Hinblick auf Wärmekapazität und -leitfähigkeit stehen verschiedene Kalorimeter in unterschiedlichen Größen- und Temperaturbereichen sowie zwei Laser-Flash-Anlagen zur Verfügung. Die morphologischen Untersuchungsmethoden umfassen Licht- und Laser-Scanning-Mikroskopie zur Bestimmung von Teilchenform und Teilchengrößenverteilungen, Rauigkeit sowie Homogenität von Oberflächen sowie Röntgenpulverdiffraktometrie zur Strukturanalyse.

**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  $5 kW_e$  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. Mithilfe 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  $-20\text{ °C}$  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 von bis zu  $2000\text{ m}^3$  pro Stunde.

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

**2** *Klimakammer zur Charakterisierung von Brennstoffzellenstapeln und -systemen mit Leistungen bis  $5 kW_e$ .*

# GASTWISSENSCHAFTLER

*Dr. Hatem Bentaher*

*Higher Institute of Industrial Systems, Gabes, Tunesien  
1.7.–31.12.2012, Arbeitsgebiet: Solare Kühlung*

*Julius Denafas*

*Baltic Solar Energy, Vilnius, Litauen  
1.2.2012–31.1.2013, Arbeitsgebiet: Herstellung und  
Charakterisierung von Metallkontaktstrukturen*

*Karoline Fath*

*Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe  
1.11.2010–31.10.2013, Arbeitsgebiet: Lebenszyklusanalyse von  
gebäudeintegrierten PV-Anlagen*

*Jesús Febres Pascual*

*National University of Ireland, Galway, Ireland  
1.9.–30.11.2012, Arbeitsgebiet: Energieeffiziente Gebäude*

*Simon Fey*

*Hochschule Offenburg, Offenburg  
1.9.2011–31.7.2014, Arbeitsgebiet: Energie-Gateway*

*Matteo Greppi*

*Università di Bologna, Bologna, Italien  
3.2.–3.6.2012, Arbeitsgebiet: Photovoltaisch Thermische Hybrid-  
Kollektoren*

*Antti Haarahiltunen*

*Aalto University, School of Electrical Engineering, Aalto, Finnland  
1.5.–31.7.2012, Arbeitsgebiet: Simulation von Verunreinigungen in  
Silicium*

*Dr. Henner Kampwerth*

*University of New South Wales, Photovoltaics Centre of Excellence,  
Sydney, Australien  
16.–23.10.2012, Arbeitsgebiet: Charakterisierung von Silicium und  
Solarzellen*

*Antanas Katalevskis*

*Kaunas University of Technology, Kaunas, Litauen  
1.2.2011–31.1.2012, Arbeitsgebiet: Fe-Imaging mit  
Photolumineszenz*

*Rodrigo Lopes Sauaia*

*Pontifical Catholic University of Rio Grande do Sul,  
Porto Alegre/RS, Brasilien  
1.12.2011–31.1.2013, Arbeitsgebiet: Laser Structuring with LCP*

*Raymond Sterling Garay*

*National University of Ireland, Galway, Ireland  
1.9.–30.11.2012, Arbeitsgebiet: Energieeffiziente Gebäude*

*Ieva Meiere*

*Riga Technical University, Riga, Litauen  
1.2.2012–31.1.2013, Arbeitsgebiet: Korrosionsuntersuchungen an  
Bipolarplatten für PEM-Elektrolyse*

*Daisuhe Nishi*

*National Institute of Advanced Industrial Science and Technology  
(AIST), Tsukuba, Japan, 27.8.–21.9.2012, Arbeitsgebiet: Charakteri-  
sierung von III-V-Mehrfachsolarzellen*

*Dr. Wattana Ratismith*

*Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand  
2.–26.10.2012, Arbeitsgebiet: Stationär konzentrierende solarthermi-  
sche Kollektoren*

*Salla Päivikki Repo*

*Aalto University, School of Electrical Engineering, Aalto, Finnland  
5.3.2012–28.2.2013, Arbeitsgebiet: Zusammenarbeit mit Charakte-  
risierung und Technologie im Bereich  $Al_2O_3$ , Black Silicon, Material-  
charakterisierung*

*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*

*Prof. Dr. Melkon Tatlier*

*Istanbul Technical University, Istanbul, Türkei  
1.10.2012–30.9.2013, Arbeitsgebiet: Energieeffiziente Gebäude*

*Dr. Nada Zamel*

*University of Waterloo, Waterloo, Kanada  
1.10.2011–30.9.2013, Arbeitsgebiet: Wassermanagement und  
Brennstoffzellen*

# KONGRESSE, TAGUNGEN UND SEMINARE

*PV Rollout, 2<sup>nd</sup> 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*

*SiliconFOREST, Falkau, 4.–7.3.2012*

*Energy Storage, Düsseldorf, 13./14.3.2012*

*SiliconPV, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Leuven, Belgien, 3.–5.4.2012*

*CPV-8, 8<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Toledo, Spanien, 16.–18.4.2012*

*Workshop »Induktive Ladesysteme«, Forum ElektroMobilität e. V., Berlin, 17.4.2012*

*Workshop »Industriearbeitskreis zum Projekt OGEMA 2.0«, 20.4.2012, Kassel*

*Workshop »PV-Module Reliability«, Lugano, Schweiz, 3./4.5.2012*

*22. Symposium Thermische Solarenergie (OTTI), Kloster Banz, Bad Staffelstein, 9.–11.5.2012*

*Fraunhofer-Energietage, Berlin, 10./11.5.2012*

*KONGRESS, Forum ElektroMobilität e. V., Berlin, 15./16.5.2012*

*Workshop »Chancen und Anforderungen für Kunststoffe in der Solarthermie«, Berlin, 16.5.2012*

*Berliner Energie-Tage, Berlin, 23.–25.5.2012*

*38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Austin, TX, USA, 3.–8.6.2012*

*7<sup>th</sup> Seminar Power Electronics for Photovoltaics (OTTI), München-Dornach, 11./12.6.2012*

*Fachforum »Quality of PV-Systems« (OTTI), München, 12.6.2012*

*Intersolar Europe Conference, München, 11.–14.6.2012*

*3. VDI Konferenz »Wärmepumpen – Umweltwärme effizient nutzen«, Düsseldorf, 19./20.6.2012*

*2<sup>nd</sup> Seminar Power Electronics for Photovoltaics, San Francisco, CA, USA, 9.7.2012*

*1<sup>st</sup> International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, San Francisco, CA, USA, 9.–11.7.2012*

*Intersolar North America Conference, San Francisco, CA, USA, 9.–12.7.2012*

*Fachforum »Netzferne Stromversorgung mit Photovoltaik« (OTTI), Freiburg, 17./18.9.2012*

*27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition Frankfurt, 24.–28.9.2012*

*4. VDI-Fachtagung »Solarthermie – Heizen und Kühlen mit der Sonne«, Ludwigsburg, 27./28.9.2012*

*FVEE-Jahrestagung, Berlin, 16./17.10.2012*

*Solar Summit Freiburg, Freiburg, 18./19.10.2012*

*VDI-Fachkonferenz »Thermische Energiespeicher in der Energieversorgung«, Ludwigsburg, 23./24.10.2012*

*Workshop »ModQS – Automatisierte Fehlerdiagnose in Heizungssystemen«, Freiburg, 8./9.11.2012*

*7<sup>th</sup> International Renewable Energy Storage Conference and Exhibition (IRES 2012), 12.–14.11.2012, Berlin, Germany*

*4<sup>th</sup> Workshop on MWT Solar Cell and Module Technology, Amsterdam, Niederlande, 20./21.11.2012*

*Die genannten Kongresse, Tagungen und Seminare hat das Fraunhofer ISE 2012 (mit-)organisiert.*

# PROMOTIONEN

*Jonathan Hampel*

*»HCl Gas Gettering of 3d Transition Metals for Crystalline Silicon Solar Cell Concepts«*

*Johannes Gutenberg-Universität Mainz  
Mainz, 2012*

*Jonas Haunschild*

*»PL-Imaging – Vom Block zum Modul«*

*Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,  
Freiburg, 2012*

*Dirk Jacob*

*»Gebäudebetrieboptimierung. Verbesserung von Optimierungsmethoden und Optimierung unter unsicheren Randbedingungen«*

*Universität Karlsruhe  
Karlsruhe, 2012*

*Annerose Knorz*

*»Entwicklung und Charakterisierung von Laserablationsverfahren für die Silizium-Solarzellenherstellung«*

*Universität Konstanz  
Konstanz, 2012*

*Stefan Lindekugel*

*»Process Optimisations for Improved Performance of Recrystallised Wafer Equivalent Solar Cells«*

*Universität Konstanz  
Konstanz, 2012*

*Jochen Link*

*»Elektromobilität und erneuerbare Energien: Lokal optimierter Einsatz von netzgekoppelten Fahrzeugen«*

*TU Dortmund  
Dortmund, 2012*

*Christoph Maurer*

*»Theoretical and Experimental Analysis and Optimization of Semi-Transparent Solar Thermal Façade Collectors«*

*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Karlsruhe, 2012*

*Nilofar Moghbel*

*»Development of a Model of Evaluating Veiling Reflection on Monitor Screens under Daylight in Office Rooms«*

*Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Karlsruhe, 2012*

*Jan-Frederik Nekarda*

*»Laser Fired Contacts (LFC) – Charakterisierung, Optimierung und Modellierung eines Verfahrens zur lokalen Rückseitenkontaktierung dielektrisch passivierter Silizium-Solarzellen«*

*Universität Konstanz  
Konstanz, 2012*

*Dirk Reinwand*

*»Dynamisches Magnetron-Sputterverfahren zur Vorderseitenmetallisierung kristalliner Silicium-Solarzellen«*

*Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Freiburg, 2012*

*Robert Woehl*

*»Entwicklung und Charakterisierung einer rückseitig kontaktierten und sammelnden n-Typ Silizium-Solarzelle mit Aluminium-Emitter«*

*Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Freiburg, 2012*



# NACHWUCHSFÖRDERUNG

Das Fraunhofer ISE ist auch in der Förderung 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.

## **Girls' Day 2012**

Auch 2012 lud das Fraunhofer ISE wieder zum bundesweiten Girls' 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](http://www.girls-day.de)

## **Umwelt-Talent School 2012**

Vom 29. bis 31. Oktober 2012 fand am Fraunhofer ISE zum zweiten Mal die Umwelt-Talent-School statt. Dabei vermittelten erfahrene Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler theoretische und praktische Kenntnisse rund um das Thema Solarenergie. Zu Gast waren 31 naturwissenschaftlich-technisch interessierte Schülerinnen und Schüler der Klassenstufen 9–13. 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 2013 fortgesetzt.

[www.ise.fraunhofer.de/de/studium-jobs-und-karriere/talent-school](http://www.ise.fraunhofer.de/de/studium-jobs-und-karriere/talent-school)

## **»Solarforscher zu Gast in der Schule«**

Mit dieser an Schulen im Freiburger Raum gerichteten Aktion will das Fraunhofer ISE Schüler zu einer Ausbildung im Bereich der Solartechnik motivieren. Gemeinsam mit Vertretern des Vereins Solare Zukunft e. V. gestalten junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eine Unterrichtsstunde. Neben der Schilderung des eigenen Ausbildungswegs und dem Blick in den Alltag eines Solarforschers wird das Thema Solarenergie in anschaulichen Experimenten vermittelt – eine willkommene Abwechslung zum Stundenplan.

[www.solarezukunft.org](http://www.solarezukunft.org)

# ERTEILTE PATENTE

*Verfahren zur lokalen Hochdotierung und Kontaktierung einer Halbleiterstruktur, welche eine Solarzelle oder eine Vorstufe einer Solarzelle ist*

*Suwito, Dominik; Benick, Jan; Jäger, Ulrich*

*DE 10 2010 006 315 A1*

*Solarzellenbaugruppe sowie Solarzellenanordnung*

*Peharz, Gerhard; Nitz, Peter; Schmidt, Thomas; Bösch, Armin;*

*Jaus, Joachim; Bett, Andreas*

*2012/00101*

*Verfahren zum Nachführen eines Solargenerators nach der Sonne, Steuerung für eine Solaranlage und Solaranlage*

*Burger, Bruno; Stalter, Olivier*

*EP 2 406 694 A3, ZA 2011/06576*

*Konzentrator für Solarstrahlung und dessen Verwendung*

*Wirth, Harry*

*DE 10 2008 014 618 A1*

*Fluidverteilungselement für eine fluidführende Vorrichtung, insbesondere für ineinander verschachtelte mehrkanalartige Fluidführungsapparate*

*Sicre, Benoit; Oltersdorf, Thore; Hermann, Michael*

*EP 2 220 451 A1*

*Solarzelle und Verfahren zur Herstellung einer Solarzelle*

*Clement, Florian; Biro, Daniel; Menkö, Michael; Kubera, Tim*

*DE 10 2008 033 632 A1*

*Messverfahren und Vorrichtung zur Charakterisierung eines Halbleiterbauelementes*

*Warta, Wilhelm; Kasemann, Martin; Carstensen, Jürgen;*

*Schütt, Andreas; Föll, Helmut*

*EP 2 245 473 B1, EP 2 245 473 A2*

*Halbleiterbauelement und dessen Verwendung*

*Dimroth, Frank; Schöne, Jan*

*EP 2 031 641 A1*

*Steuerbare Umschaltvorrichtung für ein Solarmodul*

*Burger, Bruno; Schmidt, Heribert*

*US 2010/0295381 A1*

*Thermischer Kunststoffkollektor mit eingeschobenem Absorberkörper*

*Köhl, Michael; Weiß, Karl-Anders; Müller, Axel;*

*Franke, Hannes*

*DE 10 2007 041 267 A1*

*Mehrfachsolarzelle*

*Dimroth, Frank; Schöne, Jan*

*EP 2 012 367 A1*

*Verfahren zum Aufbringen einer Struktur auf ein Halbleiterbauelement*

*Schultz-Wittmann, Oliver; Granek, Filip; Grohe, Andreas*

*US 2010/0301456 A1*

*Frontseitig serienverschaltetes Solarmodul*

*Löckenhoff, Rüdiger*

*CN 101647125 A*

*Verfahren zur Metallisierung von Halbleiterbauelementen und deren Verwendung*

*Grohe, Andreas; Nekarda, Jan; Schultz-Wittmann, Oliver*

*JP 5111507*

*Wechselrichter mit integrierter Ansteuerung und Regelung für einen Tracker*

*Burger, Bruno; Lerchenmüller, Hansjörg*

*KR 10-1159253, US 2010/0126553 A1*

*Teiltransparenter statischer Sonnenschutz*

*Kuhn, Tilmann; Hermann, Michael*

*EP 2 047 055 A1*

*Verfahren zum Betreiben einer Direktoxidationsbrennstoffzelle und entsprechende Anordnung*

*Eccarius, Steffen; Litterst, Christian; Koltay, Peter*

*US 2008/0318090 A1*

*Verfahren und Vorrichtung zur Präzisionsbearbeitung von Substraten und dessen Verwendung*

*Kray, Daniel; Reber, Stefan; Mayer, Kuno; Hopman, Sybille; Biro, Daniel; Mette, Ansgar*

*EP 1 979 125 A1*

*Schaltungsanordnung mit Doppeldrossel zur Erzeugung einer Wechselspannung oder eines Wechselstroms*

*Schmidt, Heribert; Burger, Bruno*

*US 2009/0168467 A1*

*Verfahren zur trockenchemischen Behandlung von Substraten, sowie dessen Verwendung*

*Reber, Stefan; Willeke, Gerhard*

*JP 5133257*

*System mit Verglasungselement und Gasversorgungsvorrichtung*

*Graf, Wolfgang; Rox, Rainer*

*2,456,111 C*

*Schutzschalteinrichtung für ein Solarmodul*

*Burger, Bruno; Schmidt, Heribert*

*JP 4999839*

*Vorrichtung und Verfahren zur kontinuierlichen Gasphasenabscheidung unter Atmosphärendruck und deren Verwendung*

*Reber, Stefan; Hurrle, Albert; Schillinger, Norbert*

*5138594*

*Anordnung von Wärmetauscherplatten, die in thermischem Kontakt mit einem Adsorbens stehen*

*Schmidt, Ferdinand; Schnabel, Lena; Henning, Hans-Martin;*

*Nunez, Tomas; Henninger, Stefan*

*EP 1 920 202 A1*

*Solarzellenmodul und Verfahren zu seiner Herstellung*

*Jaus, Joachim; Bett, Andreas; Bösch, Armin; Dimroth, Frank;*

*Lerchenmüller, Hansjörg*

*CN 101238587A, EP 1 913 643 A1, KR 10-1183743,*

*US 2008/0230109 A1*

*PKW-Klimaanlagen mit Adsorptionswärmepumpen*

*Henning, Hans-Martin; Mittelbach, Walter*

*CN 101098794, JP 2008-518835, US 2008/0066473 A1*

*Vorrichtung mit einem ein Medium führenden Kanal und Verfahren zur Entfernung von Einschlüssen*

*Koltay, Peter; Litterst, Christian; Eccarius, Steffen*

*DE 10 2005 005 231 A1*

*Verfahren zur gleichzeitigen Rekristallisierung und Dotierung von Halbleiterschichten und nach diesem Verfahren hergestellte Halbleiterschichtsysteme*

*Reber, Stefan*

*US 2011/0018102 A1*

*Solarzelle sowie Verfahren zu deren Herstellung*

*Hinsch, Andreas; Georg, Andreas; Niggemann, Michael*

*US 2005/0098203 A1*

# VORLESUNGEN UND SEMINARE

## **Albert-Ludwigs-Universität Freiburg**

*Dr. Peter Fuß-Kailuweit*

»Selected Semiconductor Devices«, Seminar WS 11/12 und WS 12/13,  
Master Online Photovoltaics (MOPV)

*Dr. Stefan Glunz*

»Photovoltaische Energiekonversion«, Vorlesung SS 12,  
Technische Fakultät

*Dr. Stefan Glunz, Dr. Martin Schubert, Dr. Harry Wirth*

»Crystalline Silicon Photovoltaics«, Vorlesung SS 12,  
Master Online Photovoltaics (MOPV)

*Dr. Stefan Glunz, Dr. Uli Würfel*

»Fundamentals of Solar Cells«, Vorlesung WS 11/12 und WS 12/13,  
Master Online Photovoltaics (MOPV)

*Prof. Dr. Elisabeth von Hauff*

»Physik organischer Halbleiter«, Vorlesung SS 12, Fakultät für Physik  
und Mathematik

*Dr. Doreen Kalz*

»Case Study: Energy Efficiency in Buildings«, Seminar SS 12, Zentrum  
für Erneuerbare Energien (ZEE), Studiengang Renewable Energy  
Management (REM)

*Dr. Gerald Siefer*

»III-V Solar Cells and Concentrator Systems«, Vorlesung WS 11/12  
und WS 12/13, Master Online Photovoltaics (MOPV)

*Dr. Werner Platzer, Dr. Ralf Preu, Dr. Christof Wittwer*

»Technology I«, Vorlesung WS 11/12 Zentrum für Erneuerbare  
Energien (ZEE), Studiengang Renewable Energy Management (REM)

*Dr. Werner Platzer, Dr. Christof Wittwer,*

*Dr. Bernhard Wille-Haussmann, Raphael Hollinger,*

*Dr. Jochen Link, Dr. Olivier Stalter, Gregor Dötter*

»Elective II – Energy Efficiency and Solar Thermal Energy«,  
Vorlesungsmodul SS 12, Zentrum für Erneuerbare Energien (ZEE),  
Studiengang Renewable Energy Management (REM)

*Dr. Ralf Preu*

»Solar Cell Production Technology«, Vorlesung SS 12, Master Online  
Photovoltaics (MOPV)

*Dr. Ralf Preu, Dr. Christof Wittwer*

»Photovoltaics«, Vorlesung SS 12, Zentrum für Erneuerbare Energien  
(ZEE), Studiengang Renewable Energy Management (REM)

*Dipl.-Ing. Stefan Reichert*

»Grid Integration and Control of PV Systems«, Vorlesung WS 11/12,  
Master Online Photovoltaics (MOPV)

*Dr. Olivier Stalter*

»Fundamentals of PV Systems«, 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 12,  
Fakultät für Physik und Mathematik

*Prof. Dr. Eicke R. Weber, Dr. Uli Würfel,*

»Photovoltaik«, Oberseminar SS 12 und WS 12/13, Fakultät für  
Physik und Mathematik

*Dr. Christof Wittwer*

»Smart Grid and Autonomous Communities«, Vorlesung WS 11/12,  
Master Online Photovoltaics (MOPV)

*Dr. Uli Würfel*

»New Concepts for Photovoltaic Energy Conversion«, Vorlesung  
SS 12, Master Online Photovoltaics (MOPV)



**Duale Hochschule Ravensburg**

*Prof. Dr. Bruno Burger*

»Solar-Technologien«, Vorlesung SS 12, Studiengang Elektrotechnik-Automatisierungstechnik

*M.Eng. Dirk Kranzer*

»Leistungselektronik«, Vorlesung WS11/12, Studiengang Elektrotechnik-Automatisierungstechnik

**Hector School, Karlsruhe**

*Prof. Dr. Bruno Burger*

»Green Mobility Engineering – Power Electronics«, Vorlesung WS 11/12

*Prof. Dr. Bruno Burger*

»Energy Engineering and Management – Power Electronics«, Vorlesung SS 12

*Dr. Christof Wittwer*

»Smart Grid Technology«, Vorlesung WS 12

**Hochschule Offenburg**

*Dipl.-Ing. Norbert Pfanner*

»Solartechnologie«, Vorlesung SS 12, Studiengang Elektrotechnik/Informationstechnik<sup>Plus</sup>

**KIT Karlsruher Institut für Technologie**

*Prof. Dr. Bruno Burger*

»Leistungselektronische Systeme für regenerative Energiequellen«, Vorlesung WS 12/13, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

*Dr. Heribert Schmidt*

»Photovoltaische Systemtechnik«, Vorlesung SS 12, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

**Ruhr-Universität Bochum**

*Dr. Dietmar Borchert*

»Photovoltaics«, Vorlesung WS 12/13, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

**Staatliche Akademie der Bildenden Künste, Stuttgart**

*Dipl.-Ing. Florian Kagerer*

»Bauökologie/Energieeffizientes Bauen«, Vorlesung SS 12, Studiengang Architektur

**TFH Georg Agricola zu Bochum**

*Dr. Dietmar Borchert*

»Photovoltaik«, Vorlesung SS 12, Fachbereich Maschinentechnik

**Technische Universität Berlin**

*Anton Neuhäuser*

»CSP – Concentrating Solar Power«, WS 11/12 TU Berlin, Master Studiengang Global Production Engineering for Solar Technology

**Universität Kassel**

*Dipl.-Ing. Brisa Ortiz*

»PV Hybrid System Simulation Tools«, Seminar SS 12, European Master of Renewable Energy, EUREC

*Dipl.-Ing. Brisa Ortiz*

»Funding of R&D Projects«, SS 12, European Master of Renewable Energy, EUREC

**Universität Koblenz-Landau**

*Dr. Doreen Kalz*

»Solares Bauen«, Präsenzveranstaltung WS 12/13, Fernstudiengang Energiemanagement

*Neben den genannten Lehrtätigkeiten an Hochschulen führen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler des Fraunhofer ISE auch regelmäßig praxisorientierte Aus- und Weiterbildungsveranstaltungen für interessierte Teilnehmerinnen und Teilnehmer aus der Wirtschaft und der Industrie durch. So bieten wir z. B. in der Reihe »PV-Training« Seminare und Workshops zur Siliciumtechnologie an oder vermitteln im OTTI-Seminar »Netzferne Stromversorgung« Wissen über Produkte, Planung und Aufbau im Bereich netzferner Stromversorgungssysteme.*

# BÜCHER

Glunz, S. W.; Preu, R.; Biro, D.

»Crystalline Silicon Solar Cells: State-of-the-Art and Future Developments«, in: *Comprehensive Renewable Energy*, Chapter 1.16, Sayigh, A., Elsevier, Oxford, 2012, pp. 353-387, ISBN 9780080878737

Groos, U.; Gerteisen, D.

»Micro Fuel Cells«, in: *Fuel Cell Science and Engineering: Materials, Processes, Systems and Technology*, Chapter Micro Fuel Cells, Stolten, D.; Emonts, B., Wiley-VCH Verlag, Weinheim, Germany, 2012, pp. 131-145, ISBN 9783527330126

Lang-Koetz, C.<sup>2</sup>; Hinsch, A.; Beucker, S.<sup>1</sup>

»Dye Solar Cells«, in: *Nanotechnology and Energy: Science, Promises, and Limits*, Chapter 3.2, Lambauer, J.; Voss, A.; Fahl, U., Pan Stanford Publishing, Singapore, Singapore, 2012, pp. 114-128, ISBN 9789814310819

Mack, S.; Wolf, A.

»Bericht PTJ Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2011/MASSE-Projekt«, in: *Forschungsjahrbuch Erneuerbare Energien 2011*, Chapter MASSE – Massenfertigungstaugliche Verfahren für die Herstellung von monokristallinen Solarzellen mit 20 % Wirkungsgrad, PTJ, Germany, 2012

Philipps, S.; Dimroth, F.; Bett, A.

»High Efficiency III-V Multi-Junction Solar Cells«, in: *Practical Handbook of Photovoltaics*, Chapter ID-2 – High-Efficiency III-V Multi-junction Solar Cells, McEvoy, A.; Markvart, T.; Castaner, L., Elsevier Academic Press, Maryland Heights, MO, USA, 2012, pp. 417-448, ISBN 9780123859341

Philipps, S.; Guter, W.; Welser, E.; Schöne, J.; Steiner, M.; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Present Status in the Development of III-V Multi-Junction Solar Cells«, in: *Next Generation of Photovoltaics: New Concepts*, Chapter 1, Ana Belén Cristóbal López, Antonio Martí Vega, Antonio L. Luque López, Springer, Berlin, Germany, 2012, pp. 1-22, ISBN 978-3-642-23368-5

Schmidt, D.<sup>3</sup>; Kalz, D.

»LowEx Technologien – Analyse und Bewertung von LowEx-Technologien in Heiz- und Kühlkonzepten in Nichtwohngebäuden«, in: *Allianz Bau: Innovationen für die Baubranche*, Sedlbauer, K., Fraunhofer-Verlag, Stuttgart, Germany, 2012, pp. 143-151, ISBN 9783839603451

Willeke, G. P.; Weber, E. R.

»Introduction«, in: *Advances in Photovoltaics*, Willeke, G.; Weber, E. R., Vol. 1, Academic Press, Waltham, MA, USA, 2012

Willeke, G. P.; Räuber A.<sup>4</sup>

»On the History of Terrestrial PV Development – with a Focus on Germany«, in: *Advances in Photovoltaics*, Willeke, G.; Weber, E. R., Vol. 1, Academic Press, Waltham, MA, USA, 2012

Winter, D.

»Permeate Gap Membrane Distillation (PGMD)«, in: *Encyclopedia of Membranes*, Drioli, E.; Giorno, L., SpringerReference, Heidelberg, Germany, 2012

<sup>1</sup> Borderstep Institut für Innovation und Nachhaltigkeit gGmbH, Berlin, Germany

<sup>2</sup> Eisenmann AG, Böblingen, Germany (formerly with Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO, Stuttgart, Germany)

<sup>3</sup> Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Stuttgart, Germany

<sup>4</sup> PSE AG, Freiburg, Germany

# REVIEWED JOURNALS (VERÖFFENTLICHUNGEN)

Angermann, H.<sup>20</sup>; Wolke, K.<sup>55</sup>; Gottschalk, C.<sup>42</sup>; Moldovan, A.;  
Zimmer, M.; Fittkau, J.<sup>42</sup>; Roczen, M.<sup>20</sup>; Rentsch, J.

»Electronic Interface Properties of Silicon Substrates after Ozone  
Based Wet-Chemical Oxidation Studied by SPV Measurements«,  
in: *Applied Surface Science*, 258 (2012), No. 21, pp. 8387-8396  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.03.170>)

ABmus, M.; Köhl, M.

»Experimental Investigation of the Mechanical Behavior of Photo-  
voltaic-Modules as Defined Inflow Conditions«, in: *Journal of  
Photonics for Energy*, 2 (2012), No. 1, pp. 022002-1 - 022002-11  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1117/1.jpe.2.022002>)

Bauer, J.<sup>41</sup>; Kwapil, W.<sup>17</sup>; Lausch, D.<sup>14</sup>; Schubert, M.; Bothe, K.<sup>26</sup>;  
Breitenstein, O.<sup>41</sup>

»Comments on the Paper »Detection and Analysis of Hot-Spot  
Formation in Solar Cells« Published by M. Simon and E. L. Meyer in  
*Solar Energy Materials & Solar Cells* 94 (2010) 106-113«,  
in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99 (2012), pp. 362-364  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.014>)

Beaucarne, G.<sup>10</sup>; Schubert, G.<sup>52</sup>; Hoornstra, J.<sup>11</sup>; Horzel, J.<sup>22</sup>;  
Glunz, S. W.

»Summary of the Third Workshop on Metallization for Crystalline  
Silicon Solar Cells«, in: *Energy Procedia*, 21 (2012), No. 12, pp. 2-13  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.05.002>)

Bivour, M.; Reichel, C.; Hermle, M.; Glunz, S.

»Improving the a-Si:H(p) Rear Emitter Contact of n-Type Silicon  
Solar Cells«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 106 (2012),  
pp. 11-16  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.06.036>)

De Sio, A.<sup>33</sup>; Chakanga, K.<sup>44</sup>; Sergeev, O.<sup>44</sup>; von Maydell, K.<sup>44</sup>;  
Parisi, J.<sup>33</sup>; von Hauff, E.

»ITO-Free Inverted Polymer Solar Cells with ZnO:Al Cathodes and  
Stable Top Anodes«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*,  
98 (2012), pp. 52-56  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.10.015>)

Deschler, F.<sup>9</sup>; De Sio, A.<sup>33</sup>; von Hauff, E.; Kutka, P.<sup>39</sup>; Sauermann, T.<sup>39</sup>;  
Egelhaaf, H.-J.<sup>39</sup>; Hauch, J.<sup>39</sup>; Da Como, E.<sup>34</sup>

»The Effect of Ageing on Exciton Dynamics, Charge Separation,  
and Recombination in P3HT/PCBM Photovoltaic Blends«,  
in: *Advanced Functional Materials*, 22 (2012), No. 7, pp. 1461-1469  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.201101923>)

Ecker, B.<sup>33</sup>; Engelhaaf, H.-J.<sup>39</sup>; Stein, R.<sup>39</sup>; Parisi, J.<sup>33</sup>; von Hauff, E.

»Understanding S-Shaped Current-Voltage Characteristics in Organic  
Solar Cells Containing a TiO<sub>x</sub> Interlayer with Impedance Spectroscopy  
and Equivalent Circuit Analysis«, in: *The Journal of Physical  
Chemistry C*, 116 (2012), No. 31, pp. 16333-126337  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1021/jp305206d>)

Fell, A.

»Influence of Pulse Duration on the Doping Quality in Laser  
Chemical Processing (LCP) – a Simulative Approach«,  
in: *Applied Physics A*, (2012)  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1007/s00339-012-7144-7>)

Ferrara, C.; Philipp, D.

»Why Do PV Modules Fail?«, in: *Energy Procedia*, 15 (2012),  
pp. 379-387  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.02.046>)

Fischer, S.; Hallermann, F.<sup>35</sup>; Eichelkraut, T.<sup>32</sup>; von Plessen, G.<sup>35</sup>;  
Krämer, K.<sup>5</sup>; Biner, D.<sup>5</sup>; Steinkemper, H.; Hermle, M.; Goldschmidt, J.

»Plasmon Enhanced Upconversion Luminescence Near Gold  
Nanoparticles – Simulation and Analysis of the Interactions«,  
in: *Optics Express*, 20 (2012), No. 1, pp. 271-282  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.000271>)

Fischer, S.; Steinkemper, H.; Löper, P.; Hermle, M.

»Modeling Upconversion of Erbium Doped Microcrystals Based on  
Experimentally Determined Einstein Coefficients«, in: *Journal of  
Applied Physics*, 111 (2012), No. 1, pp. 013109  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3674319>)

Giesecke, J.; Niewelt, T.; Rüdiger, M.; Rauer, M.; Schubert, M.;  
Warta, W.

»Broad Range Injection-Dependent Minority Carrier Lifetime from  
Photoluminescence«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*,  
102 (2012), pp. 220-224  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.03.015>)

## REVIEWED JOURNALS

Giesecke, J.; Schubert, M.; Warta, W.

»Measurement of Net Dopant Concentration via Dynamic Photoluminescence«, in: *Journal of Applied Physics*, 112 (2012), No. 6, pp. 063704-0637011  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.4752722>)

Giesecke, J.; Schubert, M.; Warta, W.

»Self-Sufficient Minority Carrier Lifetime in Silicon from Quasi-Steady-State Photoluminescence«, in: *physica status solidi a*, 209 (2012), No. 11, pp. 2286–2290  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssa.201228383>)

Greulich, J.; Fellmeth, T.; Glatthaar, M.; Biro, D.; Rein, S.

»Comparison of Analytical and Numerical Models for the Optimization of c-Si Solar Cells' Front Metallization«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2 (2012), No. 4, pp. 588-591  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2206567>)

Greulich, J.; Glatthaar, M.; Rein, S.

»Separation of Series Resistance and Space Charge Region Recombination in Crystalline Silicon Solar Cells From Dark and Illuminated Current-Voltage Characteristics«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2 (2012), No. 3, pp. 241-246  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2189370>)

Greulich, J.; Jäger, U.; Rein, S.; Preu, R.

»A Review and Comparison of One- and Two-Dimensional Simulations of Solar Cells Featuring Selective Emitters«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2 (2012), No. 4, pp. 441-449  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2199083>)

Gutmann, J.; Peters, M.; Bläsi, B.; Hermle, M.; Gombert, A.<sup>50</sup>; Zappe, H.<sup>8</sup>; Goldschmidt, J. C.

»Electromagnetic Simulations of a Photonic Luminescent Solar Concentrator«, in: *Optics Express*, 20 (2012), pp. A157-A167  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1364/OE.20.00A157>)

Hartmann, P.; Gerteisen, D.

»Local Degradation Analysis of a Real Long-Term Operated DMFC-Stack-MEA«, in: *Journal of Power Sources*, 219 (2012), pp. 147-154  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jpowsour.2012.07.048>)

Haunschild, J.; Reis, I.; Chipei, T.; Thaidigsmann, B.; Linse, M.; Rein, S.  
»Rating and Sorting of mc-Si As-Cut Wafers in Solar Cell Production Using PL Imaging«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 106 (2012), pp. 71-75  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.05.027>)

Hauser, H.; Michl, B.; Kübler, V.; Müller, C.; Hermle, M.; Bläsi, B.

»Honeycomb Texturing of Silicon via Nanoimprint Lithography for Solar Cell Applications«, in: *Journal of Photovoltaics*, 2 (2012), No. 2, pp. 114-122  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2184265>)

Henning, H.-M.; Döll, J.

»Solar Systems for Heating and Cooling of Buildings«, in: *Energy Procedia*, 30 (2012), pp. 633-653  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.11.073>)

Henninger, S. K.; Jeremias, F.; Kummer, H.; Janiak, C.<sup>23</sup>

»MOFs for Use in Adsorption Heat Pump Processes«, in: *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2012 (2012), No. 16, pp. 2625–2634  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/jeic.201101056>)

Henninger, S.; Ristić, A.<sup>43</sup>; Maučec, D.<sup>43</sup>; Kaučič, V.<sup>43</sup>

»New Two-Component Water Sorbent CaCl<sub>2</sub>-FeKIL<sub>2</sub> for Solar Thermal Energy Storage«, in: *Microporous and Mesoporous Materials*, 164 (2012), pp. 266-272  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.micromeso.2012.06.054>)

Henninger, S.; Schicktanz, M.; Hügenell, P.; Sievers, H.<sup>48</sup>;

Henning, H.-M.

»Evaluation of Methanol Adsorption on Activated Carbons for Thermally Driven Chillers Part I: Thermophysical Characterisation«, in: *International Journal of Refrigeration*, 35 (2012), No. 3, pp. 543–553  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.10.004>)

Hinsch, A.; Veurman, W.; Brandt, H.; Loayza Aguirre, R.; Bialecka, K.; Flarup Jensen, K.

»Worldwide First Fully Up-Scaled Fabrication of 60 x 100 cm<sup>2</sup> Dye Solar Module Prototypes«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20 (2012), No. 6, pp. 698-710  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1213>)



Hoheisel, R.; Bett, A. W.

»Experimental Analysis of Majority Carrier Transport Processes at Heterointerfaces in Photovoltaic Devices«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2 (2012), No. 3, pp. 398-402  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2199080>)

Hönig, R.; Kalio, A.; Sigwarth, J.; Clement, F.; Glatthaar, M.; Wilde, J.<sup>8</sup>; Biro, D.

»Impact of Screen Printing Silver Paste Components on the Space Charge Region Recombination Losses of Industrial Silicon Solar Cells«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 106 (2012), pp. 7-10  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.06.040>)

Hornung, T.; Steiner, M.; Nitz, P.

»Estimation of the Influence of Fresnel Lens Temperature on Energy Generation of a Concentrator Photovoltaic System«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99 (2012), pp. 333-338  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.024>)

Jeremias, F.; Henninger, S. K.; Janiak, C.<sup>23</sup>

»High Performance Metal-Organic-Framework Coatings Obtained via Thermal Gradient Synthesis«, in: *Chemical Communications*, 48 (2012), pp. 9708-9710  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1039/c2cc34782b>)

Jeremias, F.; Khuita, A.<sup>23</sup>; Henninger, S. K.; Janiak, C.<sup>23</sup>

»ML-100 (Al, Fe) as Water Adsorbents for the Heat Transformation Purposes – a Promising Application«, in: *Journal of Materials Chemistry*, 22 (2012), pp. 10148-10151  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1039/c2jm15615f>)

Kailuweit, P.; Peters, M.; Leene, J.<sup>51</sup>; Mergenthaler, K.<sup>4</sup>; Dimroth, F.; Bett, A. W.

»Numerical Simulations of Absorption Properties of InP Nanowires for Solar Cell Applications«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20 (2012), No. 8, pp. 945-953  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1169>)

Kalz, D.; Pfafferott, J.<sup>24</sup>; Koenigsdorff, R.<sup>25</sup>

»Betriebserfahrungen mit Thermoaktiven Bauteilsystemen«, in: *Bauphysik*, 34 (2012), No. 2, pp. 66-75  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/bapi.201200011>)

Kalz, D.; Pfafferott, J.<sup>24</sup>

»Energieeffiziente Kühlung und Thermischer Raumkomfort: Vergleichende Analyse von 8 Europäischen Nichtwohngebäuden (Teil 1)«, in: *Bauphysik*, 34 (2012), No. 6, pp. 256-267  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/bapi.201200037>)

Kasemann, M.<sup>8</sup>; Reindl, L. M.<sup>8</sup>; Michl, B.; Warta, W.; Schütt, A.<sup>30</sup>; Carstensen, J.<sup>30</sup>

»Contactless Qualitative Series Resistance Imaging on Solar Cells«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2 (2012) No. 2, pp. 181-183  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2184524>)

Koch, L.; Steinbach, F.<sup>29</sup>; Hermann, M.; Witulski, J.<sup>29</sup>; Tekkaya, A. E.<sup>29</sup>

»Processing of New Solar Absorbers in Steel Design Based on Partially Cold Roll Bonded Hybrid Semi-Finished Parts«, in: *Key Engineering Materials*, 504-506 (2012), pp. 137-142  
(online available: [www.scientific.net/KEM.504-506.137](http://www.scientific.net/KEM.504-506.137))

Köhl, M.; Heck, M.; Wiesmeier, S.

»Modelling of Conditions for Accelerated Lifetime Testing of Humidity Impact on PV-Modules Based on Monitoring of Climatic Data«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 99 (2012), pp. 282-291  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.12.011>)

Kopola, P.<sup>56</sup>; Zimmermann, B.; Filipovic, A.; Schleiermacher, H.-F.; Greulich, J.; Rousu, S.<sup>56</sup>; Hast, J.<sup>56</sup>; Myllylä, R.<sup>45</sup>; Würfel, U.

»Aerosol Printed Grid for ITO-Free Inverted Organic Solar Cells«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 107 (2012), pp. 252-258  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.06.042>)

Koschikowski, J.; Ripperger, S.<sup>7</sup>

»Desalination Using Membrane Distillation: Flux Enhancement by Feed Water Deaeration on Spiral-Wound Modules«, in: *Journal of Membrane Science*, 423-424 (2012), pp. 215-224  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.memsci.2012.08.018>)

Kost, C.; Engelken, M.<sup>3</sup>; Schlegl, T.

»Value Generation of Future CSP Projects in North Africa«, in: *Energy Policy*, 46 (2012), pp. 88-99  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.034>)

## REVIEWED JOURNALS

Kostka, J.; Schellenberg, R.<sup>54</sup>; Baitalow, F.<sup>54</sup>; Smolinka, T.; Mertens, F.<sup>54</sup>

»Concentration-Dependent Dehydrogenation of Ammonia Borane-Triglyme Mixtures«, in: *European Journal of Inorganic Chemistry*, 2012 (2012), No. 1, pp. 49-54

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/lejc.201190112>)

Kuhn, T.; Frontini, F.<sup>47</sup>

»The Influence of Various Internal Blinds on the Thermal Comfort: A New Method for Calculating the Mean Radiant Temperature in Office Spaces«, in: *Energy and Buildings*, 54 (2012), pp. 527-533

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.02.029>)

Löper, P.; Stüwe, D.; Künle, M.; Bivour, M.; Reichel, C.; Neubauer, R.; Schnabel, M.; Hermle, M.; Eibl, O.; Janz, S.; Zacharias, M.; Glunz, S. W.

»A Membrane Device for Substrate-Free Photovoltaic Characterization of Quantum Dot Based p-i-n Solar Cells«, in: *Advanced Materials*, 24 (2012), No. 23, pp. 3124-3129

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/adma.201200539>)

Mangold, H. S.<sup>26</sup>; Richter, T. V.<sup>26</sup>; Link, S.<sup>27</sup>; Würfel, U.; Ludwigs, S.<sup>27</sup>

»Optoelectronic Properties of Hyperbranched Polythiophenes«, in: *Journal of Physical Chemistry B*, 116 (2012), No. 1, pp. 154-159

(online available: <http://dx.doi.org/10.1021/jp210822s>)

Markötter, H.<sup>19</sup>; Haußmann, J.<sup>57</sup>; Dittmann, K.<sup>19</sup>; Arlt, T.<sup>19</sup>;

Wieder, F.<sup>19</sup>; Tötze, C.<sup>19</sup>; Klages, M.<sup>57</sup>; Reiter, C.<sup>57</sup>; Riesemeier, H.<sup>2</sup>; Scholta, J.<sup>57</sup>; Gerteisen, D.; Banhart, J.<sup>19</sup>; Manke, I.<sup>19</sup>

»Visualization of the Water Distribution in Perforated Gas Diffusion Layers by Means of Synchrotron X-Ray Radiography«, in: *International Journal of Hydrogen Energy*, 37 (2012), No. 9, pp. 7757-7761

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.01.141>)

Maurer, C.; Kuhn, T.

»Variable g-Value of Transparent Façade Collectors«, in: *Energy and Buildings*, 51 (2012), pp. 177-184

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2012.05.011>)

Melke, J.; Schoekel, A.<sup>31</sup>; Gerteisen, D.; Dixon, D.<sup>31</sup>;

Ettingshausen, F.<sup>31</sup>; Cremers, C.<sup>15</sup>; Roth, C.<sup>31</sup>; Ramaker, D. E.<sup>6</sup>

»The Electrooxidation of Ethanol on Pt. An In-Situ and Time-Resolved XANES Study«, in: *Journal of Physical Chemistry C*, 116 (2012), No. 4, pp. 2838-2849

(online available: <http://dx.doi.org/10.1021/jp206295h>)

Michl, B. T.; Rüdiger, M.; Giesecke, J. A.; Hermle, M.; Warta, W.; Schubert, M. C.

»Efficiency Limiting Bulk Recombination in Multicrystalline Silicon Solar Cells«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 98 (2012), pp. 441-447

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.11.047>)

Michl, B.; Giesecke, J.; Warta, W.; Schubert, M.

»Separation of Front and Backside Surface Recombination by Photoluminescence Imaging on Both Wafer Sides«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2 (2012), No. 3, pp. 348-351

(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2190585>)

Montesdeoca-Santana, A.<sup>4</sup>; Jiménez-Rodríguez, E.<sup>4</sup>;

González-Díaz, B.<sup>4</sup>; Borchert, D.; Guerrero-Lemus, R.<sup>4</sup>

»Ultra-Low Concentration Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>/NaHCO<sub>3</sub> Solution for Texturization of Crystalline Silicon Solar Cells«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20 (2012), No. 2, pp. 191-196

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1117>)

Morin, G.; Dersch, J.<sup>36</sup>; Platzer, W.; Eck, M.<sup>37</sup>; Häberle, A.<sup>46</sup>

»Comparison of Linear Fresnel and Parabolic Through Collector Power Plants«, in: *Solar Energy*, 86 (2012), No. 1, pp. 1-12

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.06.020>)

Nievendick, J.; Specht, J.; Zimmer, M.; Zahner, L.; Glover, W.; Stüwe, D.; Rentsch, J.

»Formation of a Honeycomb Texture for Multicrystalline Silicon Solar Cells Using an Inkjetted Mask«, in: *physica status solidi – Rapid Research Letters*, 6 (2012), No. 1, pp. 7-9

(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pssr.201105422>)

Nievendick, J.; Zimmer, M.; Souren, F.<sup>12</sup>; Haunschild, J.; Rentsch, J.

»Relation between Solar Cell Efficiency and Crystal Defect Etching Induced by Acidic Texturization on Multicrystalline Silicon Material«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 105 (2012), pp. 159-166

(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.05.023>)

Oltersdorf, A.; Moldovan, A.; Bayer, M.

»Surface Contamination of Silicon Wafer after Acid Texturization«, in: *Solid State Phenomena*, 187 (2012), pp. 337-340  
(online available: [www.scientific.net/SSP.187.337](http://www.scientific.net/SSP.187.337))

Peike, C.; Hülsmann, P.; Blüml, M.; Schmidl, P.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.

»Impact of Permeation Properties and Backsheet-Encapsulant Interactions on the Reliability of PV Modules«, in: *ISRN Renewable Energy*, 2012 (2012), pp. 459731-1 - 459731-5  
(online available: <http://dx.doi.org/10.5402/2012/459731>)

Peters, M.; Rüdiger, M.; Hauser, H.; Hermle, M.; Bläsi, B.

»Diffractive Gratings for Crystalline Silicon Solar Cells – Optimum Parameters and Loss Mechanisms«, in: *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, 20 (2012), No. 7, pp. 862-873  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/pip.1151>)

Reichel, C.; Granek, F.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Short-Circuit Current Losses in Back-Contacted Back-Junction Si Solar Cells: Experiment and Simulation of the Charge Collection Probability«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 3 (2012), No. 1, pp. 217-223  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2219499>)

Richter, A.; Glunz, S.; Werner, F.<sup>28</sup>; Schmidt, J.<sup>28</sup>; Cuevas, A.<sup>49</sup>

»Improved Quantitative Description of Auger Recombination in Crystalline Silicon«, in: *Physical Review B*, 86 (2012), No. 16, pp. 165202-165215  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevB.86.165202>)

Richter, T.<sup>27</sup>; Braun, C.<sup>27</sup>; Link, S.<sup>27</sup>; Scheuble, J.<sup>27</sup>; Crossland, E.<sup>17</sup>; Stelzl, F.; Würfel, U.; Ludwigs, S.<sup>27</sup>

»Regioregular Polythiophenes with Alkylthiophene Side Chains«, in: *Macromolecules*, 45 (2012), No. 14, pp. 5782–5788  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1021/ma2026644>)

Ristić, A.<sup>43</sup>; Zabukovec Logar, N.<sup>43</sup>; Henninger, S. K.; Kaučič, V.<sup>43</sup>

»The Performance of Small-Pore Microporous Aluminophosphates in Low-Temperature Solar Energy Storage: The Structure-Property Relationship«, in: *Advanced Functional Materials*, 22 (2012), No. 9, pp. 1952-1957  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/adfm.201102734>)

Rüdiger, M.; Hermle, M.

»Numerical Analysis of Locally Contacted Rear Surface Passivated Silicon Solar Cells«, in: *Japanese Journal of Applied Physics*, 51 (2012), pp. 1-3  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1143/JJAP.51.10NA07>)

Rüdiger, M.; Schmiga, C.; Rauer, M.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Efficiency Potential of n-Type Silicon Solar Cells with Aluminum-Doped Rear p+ Emitter«, in: *IEEE Transactions on Electron Devices*, 59 (2012), No. 5, pp. 1295-1303  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/TED.2012.2187655>)

Saint-Cast, P.; Kania, D.<sup>1</sup>; Heller, R.<sup>21</sup>; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»High-Temperature Stability of c-Si Surface Passivation by Thick PECVD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> with and without Hydrogenated Capping Layers«, in: *Applied Surface Science*, 258 (2012), pp. 8371-8376  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.03.171>)

Schick Tanz, M.; Hügenell, P.; Henninger, S. K.

»Evaluation of Methanol/Activated Carbons for Thermally Driven Chillers, Part II: The Energy Balance Model«, in: *International Journal of Refrigeration*, 35 (2012), No. 3, pp. 554-561  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2011.03.014>)

Schindler, F.; Schubert, M. C.; Kimmerle, A.; Broisch, J.; Rein, S.; Kwapiel, W.; Warta, W.

»Modeling Majority Carrier Mobility in Compensated Crystalline Silicon for Solar Cells«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 106 (2012), pp. 31-36  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.06.018>)

Schwantes, R.; Raluy, R. G.<sup>38</sup>; Subiela, J. V.<sup>38</sup>; Penate, B.<sup>38</sup>; Melián, G.<sup>38</sup>; Betancort, J. R.<sup>38</sup>

»Operational Experience of a Solar Membrane Distillation Demonstration Plant in Pozo Izquierdo – Gran Canaria Island (Spain)«, in: *Desalination*, 290 (2012), pp. 1-13  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2012.01.003>)

Slamova, K.; Glaser, R.; Schill, C.; Wiesmeier, S.; Köhl, M.

»Mapping Atmospheric Corrosion in Coastal Regions – Methods and Results«, in: *Journal of Photonics for Energy*, 2 (2012), No. 1, pp. 022003  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1117/1.JPE.2.022003>)

## REVIEWED JOURNALS

Stelzl, F. F.; Schulz-Gericke, J.; Crossland, E.<sup>17</sup>; Ludwigs, S.<sup>27</sup>; Würfel, U.  
»Voltage-Induced Formation of Accumulation Layers at Electrode Interfaces in Organic Solar Cells«, in: *Advanced Energy Materials*, 2 (2012), No. 8, pp. 983-991  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1002/aeem.201100569>)

Stelzl, F. F.; Würfel, U.  
»Modelling the Influence of Doping on the Performance of Bulk Heterojunction Organic Solar Cells: 1-D Effective Semiconductor vs 2-D Donor/Acceptor Model«, in: *Physical Review B*, 86 (2012), No. 7, pp. 075315  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1103/physrevb.86.075315>)

Thaidigsmann, B.; Drews, A.; Fellmeth, T.; Saint-Cast, P.; Wolf, A.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.  
»Synergistic Effects of Rear-Surface Passivation and the Metal Wrap Through Concept«, in: *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2 (2012), No. 2, pp. 109-113  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2183577>)

Thaidigsmann, B.; Greulich, J.; Lohmüller, E.; Schmeißer, S.; Clement, F.; Wolf, A.; Biro, D.; Preu, R.  
»Loss Analysis and Efficiency Potential of p-Type MWT-PERC Solar Cells«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 106 (2012), pp. 89-94  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2012.04.045>)

Thaidigsmann, B.; Linse, M.; Wolf, A.; Clement, F.; Biro, D.; Preu, R.  
»The Path to Industrial Production of Highly Efficient Metal Wrap Through Silicon Solar Cells«, in: *GREEN*, 2 (2012), No. 4, pp. 171-176  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1515/green-2012-0008>)

Wilken, S.<sup>33</sup>; Hoffmann, T.<sup>33</sup>; von Hauff, E.; Borchert, H.<sup>33</sup>; Parisi, J.<sup>33</sup>  
»ITO-Free Inverted Polymer/Fullerene Solar Cells: Interface Effects and Comparison of Different Semi-Transparent Front Contacts«, in: *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 96 (2012), pp. 141-147  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solmat.2011.09.044>)

Wirth, H.; Ferrara, C.  
»PV Module Technology and Reliability – Status and Perspectives«, in: *Green*, 2 (2012), No. 4, pp. 159-169  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1515/green-2012-0011>)

Wolf, A.; Biro, D.; Nekarda, J.; Kimmerle, A.; Mack, S.; Preu, R.  
»Erratum: »Comprehensive Analytical Model for Locally Contacted Rear Surface Passivated Solar Cells« [J. Appl. Phys. 108, 124510 (2010)]«, in: *Journal of Applied Physics*, 111 (2012), No. 2, pp. 029905  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3676280>)

Zubel, I.<sup>13</sup>; Granek, F.; Rola, K.<sup>13</sup>; Banaszczyk, K.<sup>13</sup>  
»Texturization of Si (100) Substrates Using Tensioactive Compounds«, in: *Applied Surface Science*, 258 (2012), No. 22, pp. 9067-9072  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2012.05.164>)

<sup>1</sup> Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany

<sup>2</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM, Berlin, Germany

<sup>3</sup> Center for Digital Technology and Management CDTM, Ludwig-Maximilians-Universität & Technische Universität München, Munich, Germany

<sup>4</sup> Departamento de Física Básica, Universidad de La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, Spain

<sup>5</sup> Department of Chemistry and Biochemistry, Universität Bern, Bern, Switzerland

<sup>6</sup> Department of Chemistry, The George Washington University, Washington, D. C., USA

<sup>7</sup> Department of Mechanical and Process Engineering, Technische Universität Kaiserslautern, Kaiserslautern, Germany

<sup>8</sup> Department of Microsystems Engineering, IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany

<sup>9</sup> Department of Physics and CeNS, Ludwig-Maximilians-Universität, Munich, Germany

<sup>10</sup> Dow Corning, Seneffe, Belgium

<sup>11</sup> ECN, Petten, The Netherlands

<sup>12</sup> Eindhoven University of Technology, Eindhoven, The Netherlands

<sup>13</sup> Faculty of Microsystems Electronics and Photonics, Wrocław University of Technology, Wrocław, Poland

<sup>14</sup> Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Halle, Germany

<sup>15</sup> Fraunhofer-Institute for Chemical Technology ICT, Pfaffzettel, Germany

<sup>17</sup> Freiburg Institute for Advanced Studies FRIAS, Freiburg, Germany

<sup>18</sup> Freiburger Materialforschungszentrum FMF, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany

<sup>19</sup> Helmholtz-Zentrum Berlin HZB, Berlin, Germany



- <sup>20</sup> Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie GmbH, Berlin, Germany
- <sup>21</sup> Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf HZDR, Dresden, Germany
- <sup>22</sup> IMEC, Leuven, Belgium
- <sup>23</sup> Institut für Anorganische Chemie und Strukturchemie, Heinrich-Heine Universität, Düsseldorf, Germany
- <sup>24</sup> Institut für Energiesystemtechnik INES, Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien, Offenburg, Germany
- <sup>25</sup> Institut für Gebäude- und Energiesysteme IGE, Hochschule Biberach, Biberach, Germany
- <sup>26</sup> Institut für Makromolekulare Chemie, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany
- <sup>27</sup> Institut für Polymerchemie, Universität Stuttgart, Stuttgart, Germany
- <sup>28</sup> Institut für Solarenergieforschung Hameln ISFH, Emmerthal, Germany
- <sup>29</sup> Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Technische Universität Dortmund, Dortmund, Germany
- <sup>30</sup> Institute for Materials Science, Christian-Albrechts Universität, Kiel, Germany
- <sup>31</sup> Institute for Materials Science, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, Germany
- <sup>32</sup> Institute of Condensed Matter Theory and Solid State Optics, Abbe Center of Photonics, Friedrich-Schiller Universität, Jena, Germany
- <sup>33</sup> Institute of Physics, Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg, Germany
- <sup>34</sup> Institute of Physics, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany
- <sup>35</sup> Institute of Physics, RWTH Aachen, Aachen, Germany
- <sup>36</sup> Institute of Technical Thermodynamics, Solar Research German Aerospace Center DLR, Cologne, Germany
- <sup>37</sup> Institute of Technical Thermodynamics, Solar Research German Aerospace Center DLR, Stuttgart, Germany
- <sup>38</sup> Instituto Tecnológico de Canarias ITC, Santa Lucia, Las Palmas, Spain
- <sup>39</sup> Konarka Technologies GmbH, Nuremberg, Germany
- <sup>40</sup> Solid State Physics, Lund University, Lund, Sweden
- <sup>41</sup> Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik, Halle, Germany
- <sup>42</sup> MKS Instruments, Inc., ASTex GmbH, Berlin, Germany
- <sup>43</sup> National Institute of Chemistry, Ljubljana, Slovenia
- <sup>44</sup> Next Energy EWE-Forschungszentrum für Energietechnologie, Oldenburg, Germany
- <sup>45</sup> Optoelectronics and Measurement Techniques Laboratory University of Oulu, Oulu, Finland
- <sup>46</sup> PSE AG, Freiburg, Germany
- <sup>47</sup> Politecnico di Milano, Milano, Italy
- <sup>48</sup> Quantachrome GmbH & Co. KG, Odelzhausen, Germany
- <sup>49</sup> Research School of Engineering Australian National University, Canberra, ACT Australia
- <sup>50</sup> Soitec Solar, Freiburg, Germany
- <sup>51</sup> Sol Voltaics AB, Lund, Sweden
- <sup>52</sup> Sunways, Constance, Germany
- <sup>53</sup> Technische Universität Berlin, Berlin, Germany
- <sup>54</sup> Technische Universität Bergakademie, Freiberg, Germany
- <sup>55</sup> Technologie Consulting Wolke, Althengstett, Germany
- <sup>56</sup> VTT Technical Research Centre of Finland, Oulu, Finland
- <sup>57</sup> Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg ZSW, Ulm, Germany

Alle weiteren Veröffentlichungen finden Sie im Internet unter:  
[www.ise.fraunhofer.de/veroeffentlichungen](http://www.ise.fraunhofer.de/veroeffentlichungen)

# EINGELADENE VORTRÄGE

## *Eingeladene Vorträge auf internationalen Konferenzen und Workshops*

*Alink, R.; Gerteisen, D.*

*»Fiber Based Modeling of the Liquid Water Transport in Gas Diffusion Layers«, 9<sup>th</sup> Symposium on Fuel Cell and Battery Modeling and Experimental Validation, ModVal 9 2012, Paul Scherrer Institut, Sursee, Switzerland, 2.–4.4.2012*

*Alink, R.; Gerteisen, D.; Haussmann, J.<sup>11</sup>; Markötter, H.<sup>4</sup>*

*»Water Management in Perforated Porous Transport Layers«, 19<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference WHEC, Toronto, Canada, 3.–7.6.2012*

*Bett, A. W.*

*»III-V-Based Solar Cells and Their Applications«, Seminar, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland, 14.3.2012*

*Bett, A. W.*

*»Concentrator Photovoltaic: A Technology Providing Highest Efficiency and Low Cost«, 22<sup>nd</sup> International Photovoltaic Science and Engineering Conference PVSEC-22 2012, Chinese Renewable Energy Society, Hangzhou, China, 5.–9.11.2012*

*Bett, A. W.*

*»Past, Present and Future of Concentrating Photovoltaics«, 2<sup>nd</sup> Workshop on CPV, Toyota Technical Institute, Nagoya, Japan, 13.11.2012*

*Bett, A. W.; Philipps, S. P.*

*»The Success Story of the Feed-in Tariff in Germany«, RETEM – Renewable Energies: Technology & Efficient Management, Al Akhawayn University, Ifrane, Morocco, 12./13.1.2012*

*Binder, S.*

*»Die Rolle von Glas in Solarzellen«, elmug4future, Elektronische Mess- und Gerätetechnik Thür eG, Suhl, Germany, 26./27.6.2012*

*Bromberger, K.; Dennenmoser, M.; Hebling, C.; Smolinka, T.; Vetter, M.*

*»Design Layout and Operational Experience of kW-Class all Vanadium Redox Flow Battery Stack«, The International Flow Battery Forum, Munich, Germany, 26./27.6.2012*

*Dimroth, F.; Bett, A. W.; Siefer, G.; Wiesenfarth, M.; Fuß-Kailuweit, P.; Lackner, D.; Oliva, E.*

*»High Efficiency Multi-Junction Solar Cell Technologies«, 2<sup>nd</sup> European Energy Conference, Maastricht, The Netherlands, 17.–20.4.2012*

*Dold, P.<sup>3</sup>*

*»Is There a »Best Technology« in Casting?«, 6<sup>th</sup> PV Fab Managers Forum, PV Group, Berlin, Germany, 26.3.2012*

*Dreyer, K.; Essig, S.; Kellenbenz, R.; Klinger, V.; Oliva, E.; Roesener, T.; Siefer, G.; Wekkeli, A.; Weuffen, C.; Dimroth, F.; Bett, A. W.*

*»Next Generation High Efficiency III-V Solar Cells«, EXMATEC, CRHEA-CNRS, Porquerolles, France, 30.5.–1.6.2012*

*Glatthaar, M.*

*»Metalization for High Efficiency Silicon Solar Cells«, European Photovoltaics Summer School, Polish Academy of Science, Krakow, Poland, 4.–7.7.2012*

*Glunz, S. W.*

*»Overview of the High-Efficiency C-Si Solar Cell Developments in Research and Production«, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition PVSEC, Frankfurt/Main, Germany, 24.–28.9.2012*

*Glunz, S. W.*

*»High-Efficiency Silicon Solar Cells – Research and Production«, Global Photovoltaic Conference GPVC 2012, Korea-EU International Symposium on Photovoltaics, Korean Photovoltaic Society, Busan, Republic of Korea, 20./21.11.2012*

*Glunz, S. W.*

*»Siliciumsolarzellen für Indoor-Anwendungen«, Energy Harvesting – Technologien, Anforderungen, Anwendungen, IMTEK Mikroproduktion, Fellbach, Germany, 28./29.11.2012*

*Glunz, S. W.; Cuevas, A.<sup>6</sup>*

*»Bifacial Silicon Solar Cells – An Overview«, bifiPV Workshop, International Solar Energy Research Center, Constance, Germany, 22.–24.4.2012*

Gözl, S.

»Smart Energy: Intelligente Netze und die Herausforderung für den Endkunden«, e-motion, Stadtentwicklung und IuK Technologien, Institut für Geographie, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Friedrichshafen, Germany, 24./25.5.2012

Groos, U.; Keller, S.

»Fuel Cell Systems at Fraunhofer ISE«, GdR PACS and ACTHYF Conference and Meeting, Forschungsverband FCLAB, Belfort, France, 12.6.2012

Henning, H.-M.

»Solar Energy for Electricity, Heating and Cooling. The Technology Park Vučevia as Sustainable Energy Supply Unit«, German-Croatian Energy Conference, Split, Croatia, 21.–23.5.2012

Henning, H.-M.

»Stand der solaren Kühlung – Verfahren, Techniken, Wirtschaftlichkeit«, Workshop Solare Kühlung, PTJ, Berlin, Germany, 6.11.2012

Henning, H.-M.; Schickanz, M.

»Potenziale und Grenzen der KWKK bei Antrieb mit BHKWS und Fernwärme«, Neue Chancen für Umwelt und Wärmewirtschaft, AGFW, Cologne, Germany, 4.12.2012

Hinsch, A.

»Nanomaterials for Energy Generation: Recent Advances«, Nanosolar, International Workshop on Nanotechnology in Solar and Energy Storage, Amrita Center for Nanosciences and Molecular Medicine, Kochi, Kerala, India, 24.2.2012

Hinsch, A.

»Dye Solar Cells: A Development for Organic Based Photovoltaics at Fraunhofer ISE«, Forum Organische Elektronik, InnovationLab, Heidelberg, Germany, 26.6.2012

Hinsch, A.

»Dye Solar Cells – A Development for Organic Based Photovoltaics«, European Photovoltaics Summer School, Polish Academy of Science, Krakow, Poland, 4.–7.7.2012

Hinsch, A.

»Farbstoffsolarmodule«, Summerschool »Gedruckte Materialien«, KIT, Karlsruhe, Germany, 26.7.2012

Hinsch, A.

»Industrielle Fertigung von Farbstoffsolarzellen«, Branchendialog: Nanotechnologie und Neue Materialien, Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF, Düsseldorf, Germany, 15.11.2012

Hinsch, A.

»Towards Solar Stable Dye Sensitized Electrochemical Solar Cells«, ESCI Workshop on Materials in Extreme Conditions, Aalto, Helsinki, Finland, 20.11.2012

Janz, S.; Goldschmidt, J.; Reber, S.

»PV beyond Si Wafer Technology«, Solar Summit Freiburg, Freiburg, Germany, 18./19.10.2012

Janz, S.; Löper, P.; Schnabel, M.

»Silicon Nanocrystals Produced by Solid Phase Crystallisation for PV Applications«, EMRS Spring Meeting, EMRS, Strasbourg, France, 14.–18.5.2012

Kellenbenz, R.; Klinger, V.; Wekkeli, A.

»Nichtmonotoner Tellureinbau in hochdotiertem  $\text{Ga}_{0.51}\text{In}_{0.49}\text{P}$ «, 27<sup>th</sup> DGKK-Workshop »Epitaxie von III-V-Halbleitern«, DGKK, Erlangen, Germany, 6./7.12.2012

Keller, S.; Ammon, G.; Koch, W.; Pistorius, G.; Sadeler, C.

»AMES – Autonomous Energy System for Electricity Supply and Battery Charging under Extended Climatic Conditions«, Fuel Cells 2012 Science & Technology, Berlin, Germany, 11./12.4.2012

Keller, S.; Bhattarai, A.; Gerteisen, D.; Alink, R.; Zamel, N.

»Empirical Methods for Fuel Cell Diagnostic«, D-Code & Genius Annual Workshop, Forschungsverband FCLAB, Belfort, France, 13./14.6.2012

Koch, W.

»Autarkes Mikroenergiesystem für die portable Notfallmedizin«, Öffentliches Statusmeeting für energieautarke Mikrosysteme, VDI/VDE/IT, Berlin, Germany, 6./7.2.2012

## EINGELADENE VORTRÄGE

- Koch, W.; Keller, S.; Ammon, A.; Sadeler, C.; Groos, U.; Pistorius, G.  
»AMES-Power: Portable Fuel Cell System«, f-cell and Battery Storage,  
Stuttgart, Germany, 9.10.2012
- Kranzer, D.; Wienhausen, H.; Hensel, A.  
»GaN-Leistungstransistoren in hartschaltenden und resonanten  
Anwendungen«, 41. Kolloquium Halbleiter-Leistungsbaulemente,  
AG Halbleiter-Baulemente, Freiburg, Germany, 29./30.10.2012
- Lackner, D.; Wekkeli, A.; Dimroth, F.  
»Einfluss von Wachstumsbedingungen auf verspannungskompen-  
sierte GaInAs/GaAsP Quantentöpfe«, DGKK Workshop »Epitaxie von  
III-V Halbleitern«, DGKK, Erlangen, Germany, 6./7.12.2012
- Lim, S.<sup>6</sup>; Forster, M.<sup>1</sup>; Zhang, X.<sup>6</sup>; Holtkamp, J.; Schubert, M.;  
Cuevas, A.<sup>6</sup>; MacDonald, D.  
»Photoluminescence Imaging for Net Doping Measurements of  
Surface Limited Silicon Wafers«, 22<sup>nd</sup> International Photovoltaic  
Science and Engineering Conference PVSEC-22 2012, Chinese  
Renewable Energy Society, Hangzhou, China, 5.–9.11.2012
- Lohmüller, E.  
»Leistungsprüfung nach erstem Förderjahr«, Stipendiatentag 2012,  
Reiner Lemoine Stiftung, Berlin, Germany, 27.10.2012
- Moldovan, A.; Krieg, K.; Rentsch, J.; Zimmer, M.; Gitte, T.<sup>7</sup>;  
Fittkau, J.<sup>5</sup>  
»Combined Ozone/HF/HCl/Based Cleaning and Adjusted Emitter  
Etch-Back for Silicon Solar Cells«, 11<sup>th</sup> UCPSS, IMEC, Ghent, Belgium,  
16.–19.9.2012
- Philipps, S. P.; Guter, W.  
»III-V Mehrfachsolarzellen für die konzentrierende Photovoltaik«,  
Abschlussveranstaltung Promotionsstipendienprogramm, DBU,  
Osnabrück, Germany, 9.3.2012
- Rau, S.; Fuentes, R.<sup>10</sup>; Smolinka, T.; Weidner, J.<sup>10</sup>  
»Nano-Structured Electrodes for PEM Water Electrolysis«,  
Achema 2012, Dechema, Frankfurt/Main, Germany, 21.6.2012
- Rau, S.; Smolinka, T.  
»Bewertung aktueller Entwicklungen der Elektrolysetechnologien«,  
4. Energiefachtagung, Brandenburgische Technische Universität,  
Cottbus, Germany, 4.6.2012
- Schnabel, M.; Löper, P.; Canino, M.<sup>2</sup>; Allegrezza, M.<sup>2</sup>; Bellettato, M.<sup>2</sup>;  
Lopez-Vidrier, J.<sup>8</sup>; Hernandez, S.<sup>8</sup>; Janz, S.; Summonte, C.<sup>2</sup>;  
Garrido, B.<sup>8</sup>; Wilshaw, P.<sup>9</sup>  
»Optoelectronic Characterisation of Silicon Nanocrystals Embedded  
in Silicon Carbide«, EMRS Spring Meeting, EMRS, Strasbourg, France,  
14.–19.5.2012
- Stalter, O.; Roth, W.  
»Leistungselektronik für erneuerbare Energiesysteme – Aktivitäten  
am Fraunhofer ISE«, Job und Karriere Forum TopJob Corner,  
Intersolar München/F.A.Z., Munich, Germany, 13.6.2012
- Weber, E.  
»Forschungsziel Vorsprung: Greentech-Innovationen aus  
Deutschland«, Financial Times Deutschland – Greentech 2012,  
Frankfurt/Main, Germany, 16.2.2012
- Weber, E.  
»Die Herausforderungen der Energiewende an Wissenschaft,  
Technik und Industrie«, DECHEMA e. V. Diskussionstagung,  
Frankfurt/Main, Germany, 1.3.2012
- Weber, E.  
»New Materials and Processes for Photovoltaics Manufacturing«,  
Society of Vacuum Coaters SVC Tech Conference, Santa Clara, CA,  
USA, 30.4.2012
- Weber, E.  
»The Future of Crystalline Photovoltaic Technology«, Institute of  
Electrical and Electronics Engineers IEEE Photovoltaic Specialists  
Conference, Austin, TX, USA, 5.6.2012
- Weber, E.  
»Photovoltaics – a Technology Driver and Pillar of our Sustainable  
Future Energy«, Intersolar Europe 2012, Munich, Germany, 11.6.2012
- Weber, E.  
»Energie, Mobilität und Revitalisierung«, Rio +20-Konferenz,  
Rio de Janeiro, Brazil, 15.6.2012
- Weber, E.  
»Challenges for the Transformation to a Sustainable Energy  
System«, EKC2012 EU-Korea Conference on Science and Technology,  
Berlin, Germany, 26.7.2012



Weber, E.

»The Role of Renewable Energy in the 21<sup>st</sup> Century«, Internationale Studentenkonferenz Mikrotechnologie, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany, 11.10.2012

Weber, E.

»Research Policy for Transformation of our Energy System«, Solar Summit Freiburg, Freiburg, Germany, 18.10.2012

Weber, E.

»Challenges of the Global Transformation to a Sustainable Energy System for Technology and Politics«, AvH International Conference of Asian Scholars, Taipei, Taiwan, 12.11.2012

Weber, E.

»The Role of PV in the Future Sustainable Energy System«, Fraunhofer German-Japanese Solar Day, Tokyo, Japan, 13.11.2012

Weber, E.

»Vision for Photovoltaics in the Future Eco-City and Innovative Applications for Green Buildings«, Inno Asia 2012 Conference, Hong Kong, China, 14.11.2012

Weber, E.

»PV Policy and Experiences in Distributed System in Europe«, SEMI PV China 2012, Shunde, Guangdong, China, 15.11.2012

Weber, E.

»The Global Situation and Future of PV«, SEMI PV Japan 2012 – Executive Forum, Tokyo, Japan, 6.12.2012

Wiesenfarth, M.; Helmers, H.; Gamisch, S.; Bett, A. W.

»Aktiv gekühlte Receiver in der Konzentrationphotovoltaik«, 6. Tagung Kühlung in der Elektronik 2012, Haus der Technik, Essen, Germany, 22./23.5.2012

Zamel, N.

»Dependence & Through- and In-Plane Thermal Conductivity of Carbon Paper Diffusion Media on Temperature – Experimental Findings«, 9<sup>th</sup> Symposium on Fuel Cell and Battery Modeling and Experimental Validation ModVal 9 2012, Paul Scherrer Institut, Sursee, Switzerland, 2.–4.4.2012

Zamel, N.; Bhattarai, A.; Gerteisen, D.

»Effect & Local Perturbation on Electrochemical Impedance Spectroscopy & PEM Fuel Cells – Understanding the Characteristics«, 63<sup>rd</sup> Annual Meeting of the International Society of Electrochemistry, Prague, Czech Republic, 19.–24.8.2012

Zeidler, R.; Orellana, T.; Riepe, S.; Haunschild, J.; Schumann, M.; Schmid, C.; Haas, F.; Seeber, B.

»Visualisierung zur Analyse des Kristallwachstums in multikristallinem Silicium«, DGKK-Tagung 2012, DGKK, Freiburg, Germany, 4./5.10.2012

<sup>1</sup> Apollon Solar, Lyon, France

<sup>2</sup> CNR-Istituto per la Microelettronica e Microsistemi, Bologna, Italy

<sup>3</sup> Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Halle, Germany

<sup>4</sup> Helmholtz-Zentrum Berlin HZB, Berlin, Germany

<sup>5</sup> MKS Instruments, Inc, ASTex GmbH, Berlin, Germany

<sup>6</sup> Research School of Engineering Australian National University, Canberra, ACT Australia

<sup>7</sup> Singulus Stangl Solar GmbH, Fürstfeldbruck, Germany

<sup>8</sup> Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain

<sup>9</sup> University of Oxford, Oxford, United Kingdom

<sup>10</sup> University of South Carolina, Columbia, SC, USA

<sup>11</sup> Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg (ZSW), Ulm, Germany

# IMPRESSUM

## **Redaktion**

*Marion Hopf, Christina Lotz, Karin Schneider (Leitung)*  
*Presse und Public Relations*

## **Bildquellen**

*Aeroportuali SEA Spa, Milano, Italy*

*Daimler*

*Deutsches Luft- und Raumfahrtzentrum*

*Michael Eckmann*

*Thomas Ernsting*

*Fraunhofer IBP*

*Fraunhofer ISE*

*Manz AG*

*Matthias Heyde*

*Peter Hinsell/Archiv DBU*

*Isomorph*

*Kramer GmbH*

*Novatec Solar GmbH*

*Ansgar Pudenz / Deutscher Zukunftspreis*

*Andy Ridder*

*Werner Rütz*

*Stadtmobil Südbaden AG*

*Visiotex*

## **Gestaltung und Druck**

*www.netsyn.de, Joachim Würger, Freiburg*

### **Anschrift der Redaktion**

*Fraunhofer-Institut für  
Solare Energiesysteme ISE  
Presse und Public Relations  
Heidenhofstr. 2  
79110 Freiburg  
Telefon +49 761 4588-5150  
Fax +49 761 4588-9342  
info@ise.fraunhofer.de  
www.ise.fraunhofer.de*

*Bestellung von Publikationen bitte per E-Mail.*

*Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.*

*[www.ise.fraunhofer.de/presse-und-medien/presseinformationen](http://www.ise.fraunhofer.de/presse-und-medien/presseinformationen)*

*© Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Freiburg, 2013*

# VERANSTALTUNGEN 2013

BAU, München, 14.–19.1.2013

PV Rollout, 3<sup>rd</sup> European American Solar Deployment Conference, Atlanta, GA, USA, 26./27.2.2013

Battery Expo, Tokyo, Japan, 27.2.–1.3.2013

SiliconForest, Falkau, 3.–6.3.2013

28. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI), Kloster Banz, Bad Staffelstein, 6.–8.3.2013

Energy Storage, International Summit for the Storage of Renewable Energies, Düsseldorf, 18./19.3.2013

KONGRESS – Forum ElektroMobilität, Berlin, 19./20.3.2013

SiliconPV, 3<sup>rd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics, Hameln, 25.–27.3.2013

HANNOVER MESSE, Hannover, 8.–12.4.2013

CPV-9, 9<sup>th</sup> International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems, Miyasaki, Japan, 15.–17.4.2013

23. Symposium Thermische Solarenergie (OTTI), Kloster Banz, Bad Staffelstein, 24.–26.4.2013

PCIM Europe, Nürnberg, 14.–16.5.2013

Workshop »PV-Module Reliability«, Chambéry, Frankreich, 6./7.6.2013

3<sup>rd</sup> Symposium Small PV-Applications (OTTI), Ulm, 17./18.6.2013

39<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialist Conference, Tampa, FL, USA, 16.–21.6.2013

Intersolar Europe, München, 17.–21.6.2013

6. Entwicklerforum Akkutechnologien, Aschaffenburg, 25.–27.6.2013

The International Flow Battery Forum IFBF, Dublin, Irland, 26./27.6.2013

Intersolar North America, San Francisco, CA, USA, 8.–11.7.2013

The Battery Show, Novi, Detroit, MI, USA, 17.–19.9.2013

19<sup>th</sup> SolarPACES Conference, Las Vegas, NV, USA, 17.–20.9.2013

2<sup>nd</sup> International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry, Freiburg, 23.–25.9.2013

Workshop »Polymeric Materials for Solar Thermal Applications«, Graz, Österreich, 25.9.2013

5<sup>th</sup> International Conference Solar Air-Conditioning, Bad Krozingen, 25.–27.9.2013

f-cell Forum und Battery & Storage, Stuttgart, 30.9.–2.10.2013

28<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition PVSEC, Paris, 30.9.–4.10.2013

eCarTec München 2012, München, 15.–17.10.2013

Solar Summit Freiburg, Freiburg, 23.10.2013



# 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 Energiespeicher (BVES), Mitglied und Präsidentschaft

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

Dechema

- Temporärer Arbeitskreis MOF, Mitglied
- Temporärer Arbeitskreis Thermische Energiespeicherung, Mitglied

Desertec Industrial Initiative (Dii), Assoziierter Partner

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

Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE (DKE)

- Ad-hoc-Arbeitskreis »Blitz- und Überspannungsschutz für Photovoltaik-Anlagen«
- Arbeitsgruppe »Portable Fuel Cell Systems«
- Arbeitskreis 221 »Errichtung von Photovoltaik-Anlagen nach DIN VDE 0100-712«
- Arbeitskreis Brandschutz VDE-AR-E 2100-712 »Anforderungen zur Freischaltung im DC-Bereich einer PV-Anlage«
- Komitee 373 »Photovoltaische Solarenergiesysteme«
- Komitee 374 »Solarthermische Anlagen zur Stromerzeugung«
- Komitee 384 »Brennstoffzellen«

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. (DWW), 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 Efficient Building Association (EEBA), Mitglied

Erfahrungsaustauschkreis der Prüfstellen Thermischer Solaranlagen und ihrer Bauteile EKTSuB des DIN, stellv. Obmann

EU PV Technology Platform

- WG3 »Science, Technology & Applications«, Mitglied
- WG4 »Developing Countries«, Mitglied

Europäisches Komitee für Normung (CEN)

- TC33/WG3/IG5 »Thermal and Visual Comfort«, Mitglied
- TC129/WG9 »Light and Energy Transmission, Thermal Insulation«, Mitglied
- TC169/WG11 »Daylighting in Buildings«, Mitglied
- TC312/WG1/WG2/WG3 »Solar Collectors«/» Factory Made Systems«/»Thermal Solar Systems and Components; Custom Built Systems«, 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)

- TC82/WG 1 »Wafers, Cells and Modules« – NWIP »BIPV«, Vorsitz und Mitglied
- Workshop 5 »Flow Batteries – Requirements and Test Methods«, Mitglied

## MITARBEIT IN GREMIEN

European H2/FC Technology Platform, Mitglied

European Photovoltaic Industry Association (EPIA),  
Assoziiertes Mitglied

European Power Electronics and Drives Association (EPE), Mitglied

European Renewable Energy Research Centres Agency (EUREC),  
Mitglied

European Solar Thermal Electricity Association (ESTELA), Mitglied  
sowie 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
- Arbeitskreis »TR3 – Elektrische Eigenschaften und Erzeugungseinheiten«
- Arbeitskreis »TR4 – Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen«

ForschungsVerbund Erneuerbare Energien (FVEE), Mitglied

Fraunhofer-Allianz Batterien, Lenkungskreis, Mitglied

Fraunhofer-Allianz Bau, Mitglied

Fraunhofer-Allianz Energie, Geschäftsführung und Sprecher

Fraunhofer-Allianz Nanotechnologie, Mitglied

Fraunhofer-Allianz Optic Surfaces, Mitglied

Fraunhofer-Allianz SysWasser, 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

- TC3-39 »Discomfort Glare from Daylight in Buildings«, Mitglied
- TC3-47 »Climate-Based Daylight Modelling«, Mitglied

International Electrotechnical Commission IEC

- TC82 »Solar Photovoltaic Energy Systems«, WG3/WG7, Mitglied
- TC105 »Fuel Cell Technologies«, WG7/WG11, Mitglied
- TC117 »Solar Thermal Electric Plants«, Mitglied

International Energy Agency IEA, Mitarbeit

Energy Conservation Through Energy Storage Programme ECES

- Annex 24 »Compact Thermal Energy Storage – Material Development for System Integration«

Heat Pump Programme HPP

- Annex 32 »Economical Heating and Cooling Systems for Low Energy Houses«
- Annex 38 »Solar and Heat Pump Systems – Systems Using Solar Thermal Energy in Combination with Heat Pumps«

Photovoltaic Power Systems Programme (PVPS)

- Task 9 »Development of PV Services for Regional Development«

Solar Heating & Cooling Programme SHC

- 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 47 »Renovation of Non-Residential Buildings towards Sustainable Standards«
- 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 (ISPRES), Vorsitz

International Standardization Organization ISO

- TC180 Solar Energy, WG2/WG5, 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

Photonics Baden-Württemberg, 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 PV Hybrid und Minigridd, OTTI Technologie-Kolleg, Wissenschaftlicher Beirat

Symposium Small PV Applications, OTTI Technologie-Kolleg, Wissenschaftlicher Beirat

Symposium Thermische Solarenergie, OTTI Technologie-Kolleg, Wissenschaftlicher Beirat

User Forum »ThinFilmPhotovoltaics«, Wissenschaftlicher Beirat

VDE Forum Netztechnik/Netzbetrieb (VDE-FNN)

- Projektgruppe »Blindleistung«, Mitglied

VDI-Gesellschaft Energie und Umwelt (VDI-GEU)

- Fachausschuss Regenerative Energien (FARE), Mitglied

# MESSEN

## *VDI-Gesellschaft Technische Gebäudeausrüstung (VDI-TGA)*

- *Richtlinienausschuss 4706 »Kriterien für das Innenraumklima«*
- *Richtlinienausschuss 4650, Blatt 1 und Blatt 2 »Wärmepumpen«*
- *Richtlinienausschuss 4645, »Planung und Dimensionierung von Wärmepumpen von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen in Ein- und Mehrfamilienhäusern«*
- *Richtlinienausschuss 2164 »Latentspeichersysteme«*
- *Richtlinienausschuss 6018 »Kälteversorgung in der TGA – Planung, Bau, Abnahmeprüfung, Betrieb, energetische Bewertung«*

## *VDMA – The German Engineering Federation*

- *Arbeitskreis 24247 »Energie-Effizienz Kälteanlagen«*
- *Productronics Association, Mitglied*
- *Deutsches Flachdisplay-Forum (DFF), Mitglied*
- *Organic Electronics Association (OE-A), Mitglied*

## *Verein Forum Elektromobilität, Mitglied im Fachbeirat*

## *Battery Expo*

*Tokyo, Japan, 29.2.–2.3.2012*

## *27. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI)*

*Kloster Banz, Bad Staffelstein, 29.2.–2.3.2012*

## *Energy Storage*

*International Summit for the Storage of Renewable Energies  
Düsseldorf, 13./14.3.2012*

## *HANNOVER MESSE*

*Hannover, 23.–27.4.2012*

## *6<sup>th</sup> European Conference on PV-Hybrids and Mini-Grids*

*Chambéry, Frankreich, 26.–27.4.2012*

## *22. Symposium Thermische Solarenergie (OTTI)*

*Kloster Banz, Bad Staffelstein, 9.–11.5.2012*

## *SNEC – 6<sup>th</sup> International Photovoltaic Power Generation Conference & Exhibition*

*Shanghai, China, 16.–18.5.2012*

## *Intersolar Europe / Sonderschau PV Energy World*

*München, 13.–15.6.2012*

## *Intersolar North America*

*San Francisco, CA, USA, 10.–12.7.2012*

## *CLEAN TECH MEDIA AWARD*

*Berlin, 7.9.2012*

## *27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition PVSEC*

*Frankfurt, 24.–28.9.2012*

## *f-cell Forum und Messe Battery & Storage*

*Stuttgart, 8.–10.10.2012*

## *glasstec, Sonderschau »glass technology live«*

*Düsseldorf, 23.–26.10.2012*

## *2. badenova Zukunftsforum*

*Konzerthaus Freiburg, Freiburg, 8.11.2012*



# SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

ABmus, M.; Nold, S.; Rein, S.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Performance Requirements of Crack Detection Systems in Silicon Solar Production«, in: *Energy Procedia*, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012

Bartsch, J.; Mondon, A.; Kamp, M.; Kraft, A.; Wendling, M.; Wehkamp, N.; Jawaid, M.; Lorenz, A.; Clement, F.; Schetter, C.; Glatthaar, M.; Glunz, S.

»Progress with Multi-Step Metallization Processes Featuring Copper as Conducting Layer at Fraunhofer ISE«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012*, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012,

Beck, M.<sup>83</sup>; Bopp, G.; Goetzberger, A.; Oberfell, T.; Reise, C.; Schindele, S.

»Combining PV and Food Crops to Agrophotovoltaic - Optimization of Orientation and Harvest«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012*, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Benick, J.; Müller, R.; Bateman, N.<sup>2</sup>; Hermle, M.

»Fully Implanted n-Type Pert Solar Cells«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012*, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Benoit, P.; Fey, S.; Rohbogner, G.; Kreifels, N.

»Different Approaches for Communication Systems in Large-Scale PV and CPV Installations«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012*, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Benoit, P.; Rohbogner, G.; Fey, S.; Kohrs, R.; Wittwer, C.

»Modellierung und Simulation von Kommunikationsnetzen für Smart Grid Anwendungen«, in: *Proceedings, Smart Grid – Intelligente Energieversorgung der Zukunft 2012*, Stuttgart, Germany, 5./6.11.2012

Bett, A. W.

»Konzentrator-technologie und III-V-basierende Solarzellen«, in: *Proceedings, Physikkolloquium 2012*, Ilmenau, Germany, 26.6.2012

Bett, A. W.

»Concentrator Photovoltaic: An Overview«, in: *Proceedings, Workshop on CPV 2012*, Tianjin, China, 9.11.2012, CD-ROM

Bett, A.; Wiesenfarth, M.; Philipps, S.

»Concentrating PV: Status and Perspectives«, in: *Proceedings, Solar Summit 2012*, Freiburg, Germany, 18./19.10.2012

Bläsi, B.; Hauser, H.; Wolf, A. J.

»Photon Management Structures for Solar Cells«, in: *SPIE News-room*, 2012

Bläsi, B.; Rüdiger, M.; Mellor, A.<sup>53</sup>; Peters, M.<sup>81</sup>

»Modeling of Photonic Structures for Solar Cell Applications – Aspects from Wafer Based Technology«, in: *Proceedings, International Workshop of Thin Film Solar Cells 2012*, Oldenburg, Germany, 7./8.2.2012

Bopp, G.; Merkle, M.; Schwunk, S.; Smolinka, T.

»Welche und wie viele Speicher braucht eine regenerative Stromversorgung«, in: *Proceedings, 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2012*, Bad Staffelstein, Germany, 29.2.-2.3.2012

Brand, A. A.; Knorz, A.; Zeidler, R.; Nekarda, J.; Preu, R.

»Nanosecond Laser Annealing to Decrease the Damage of Picosecond Laser Ablation of Anti-Reflection Layers on Textured Silicon Surfaces«, in: *Proceedings, SPIE Optics and Photonics 2012*, San Diego, CA, USA, 12.-16.8.2012

Braungardt, S.; Schultz, N.; Langner, R.; Oltersdorf, T.

»Tree-Shaped Two-Phase Fluid Distributor for Microchannel Heat Exchangers Used as Evaporator«, in: *Proceedings, 3<sup>rd</sup> IIR Workshop on Refrigerant Charge Reduction 2012*, Valencia, Spain, 25./26.10.2012, CD-ROM

Broisch, J.; Rein, S.; Schmidt, J.; Fertig, F.; Soiland, A.-K.<sup>26</sup>; Odden, J. O.<sup>26</sup>

»Lowly-Doped Compensated Solar-Grade CZ-Silicon for High Efficiency Solar Cell Processes«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012*, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

## SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Burhenne, L.; Rochlitz, L.; Lintner, C.; Aicher, T.

»BioSyn Biomass Gasification Process for the Production of a Tar-free Synthesis Gas«, in: *Proceedings, 20<sup>th</sup> European Biomass Conference & Exhibition 2012, Milano, Italy, 18.-22.6.2012*

Burhenne, S.

»Toward a General Methodology for Uncertainty Quantification and Sensitivity Analysis for Building Performance Simulation«, in: *Proceedings, ECBS Workshop 2012, Vienna, Austria, 23.-25.4.2012*

Burhenne, S.; Herkel, S.

»Methodik zur Unsicherheitsbewertung und Sensitivitätsanalyse für thermische Gebäudesimulationen«, in: *Proceedings, BauSIM 2012, Berlin, Germany, 26.-28.9.2012, CD-ROM*

Burhenne, S.; Pazold, M.<sup>32</sup>; Radon, J.<sup>96</sup>; Herkel, S.; Antretter, F.<sup>32</sup>

»Integration of Modelica Models into an Existing Simulation Software Using FMI for Co-Simulation«, in: *Proceedings, 9<sup>th</sup> International Modelica Conference 2012, Munich, Germany, 3.-5.9.2012, CD-ROM*

Cristóbal, A.<sup>53</sup>; Martí, A.<sup>53</sup>; Sala, G.<sup>53</sup>; Bett, A.; Ekins-Daukes, N.<sup>41</sup>; Roca, F.<sup>68</sup>; Luque-Heredia, I.<sup>10</sup>; Warmuth, W.<sup>74</sup>; Merten, J.<sup>47</sup>; Okada, Y.<sup>90</sup>; Hishikawa, Y.<sup>69</sup>; Hishikawa, Y.<sup>69</sup>; Takamoto, T.<sup>78</sup>; Araki, K.<sup>15</sup>; Fukuyama, A.<sup>89</sup>; Kuze, N.<sup>3</sup>; Kita, T.<sup>88</sup>; Kotagiri, A.<sup>84</sup>; Yamaguchi, M.<sup>91</sup>; Luque, A.<sup>53</sup>

»NGCPV: A New Generation of Concentrator Photovoltaic Cells, Modules and Systems«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Dannenberg, T.; Zimmer, M.; Rentsch, J.

»Fully Automated Concentration Control of the Acidic Texturisation Process«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Demant, M.; Greulich, J.; Rein, S.; Haunschild, J.; Glatthaar, M.

»Modelling of Physically Relevant Features in Photoluminescence Images«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Dimroth, F.

»High Efficiency Multi-Junction Solar Cell Technologies«, in: *Proceedings, Konkuk University, Fraunhofer ISE Project R&BD Program 2012, Seoul, Republic of Korea, 25.5.2012*

Dimroth, F.; Roesener, T.; Klinger, V.; Bett, A. W.; Siefer, G.; Fuß-Kailuweit, P.; Lackner, D.; Oliva, E.

»Material Science for High-Efficiency III-V Solar Cells«, in: *Proceedings, EMRS Spring Meeting 2012, Strasbourg, France, 14.-18.5.2012*

Dimroth, F.; Roesener, T.; Klinger, V.; Essig, S.; Siefer, G.; Fuß-Kailuweit, P.; Lackner, D.; Oliva, E.; Bett, A. W.

»Next Generation Multi-Junction Solar Cells for Concentrator Photovoltaic Applications«, in: *Proceedings, 16<sup>th</sup> International Conference on Metal Organic Vapor Phase Epitaxy ICMOVPE 2012, Busan, Republic of Korea, 20.-25.5.2012*

Dirnberger, D.; Müller, B.; Kräling, U.; Dittmann, S.

»Uncertainties of Laboratory Measurements for Energy Rating«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012, pp. 3294-3301*

Dötter, G.; Burger, B.; Rogalla, S.; Schönberger, S.

»Power Quality und dynamische Netzstützung: Entsprechen die Mittelspannungsrichtlinien den Eigenschaften?«, in: *Proceedings, 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 29.2-2.3.2012, CD-ROM*

Drews, A.; Clement, F.; Spribille, A.; Thaidigsmann, B.; Linse, M.; Gutscher, S.; Werner, S.; Reitenbach, V.; Ould Chighali, E.; Wolf, A.; Zimmer, M.; Zimmer, M.; Nekarda, J.; Haedrich, I.; Tranitz, M.; Eitner, U.; Wirth, H.; Wilson, H. R.; Biro, D.; Preu, R.

»HIP-MWT Solar Cells – Pilot-Line Cell Processing and Module Integration«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Driesse, A.; Dirnberger, D.; Reise, C.; Reich, N.

»Spectrally Selective Sensors for PV System Performance Monitoring«, in: *Proceedings, 38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC 2012, Austin, TX, USA, 3.-8.6.2012, CD-ROM*

Drießen, M.; Janz, S.; Reber, S.

»Epitaxial Wafer Equivalent Solar Cells with Overgrown SiO<sub>2</sub> Reflector«, in: *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Dupeyrat, P.<sup>25</sup>; Stefan, F.; Kwiatkowski, G.<sup>25</sup>; Baranzini, M.<sup>25</sup>;  
Schumann, M.<sup>25</sup>

»Performances and Yield Assessment of Glazed Photovoltaic Thermal Collectors«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012, CD-ROM*

Eitner, U.; Geipel, T.; Holtschke, S.-N.; Tranitz, M.

»Characterization of Electrically Conductive Adhesives«, in: *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Eltermann, F.; Röder, K.; Wiesenfarth, M.; Wilde, J.; Bett, A. W.

»Degradation Study on Optical Materials for Concentrator Photovoltaics«, in: *Proceedings, CPV-8 2012, Toledo, Spain, 14.-16.4.2012*

Erban, C.

»Merely U And g Will Not Be Enough«, in: *Proceedings, Engineered Transparency, Düsseldorf, Germany, 25./26.10.2012, CD-ROM*

Essig, S.; Derendorf, K.; Oliva, E.; Wekkeli, A.; Roesener, T.; Benick, J.; Hermele, M.; Siefert, G.; Bett, A. W.; Dimroth, F.

»Development of GaInP/GaAs/Si Solar Cells Using Surface Activated Wafer Bonding«, in: *Proceedings, ECS PRiME 2012, Honolulu, USA, 7.-12.10.2012*

Fahr, S.; Kramer, K.; Mehnert, S.; Hess, S.

»SolarKeymark Certification for Concentrating Collectors – Comparing the Quasi-Dynamic and the Steady-State Method of EN 12975-2:2006-A1:2010«, in: *Proceedings, 18. SolarPaces Conference 2012, Marrakesh, Morocco, 11.-14.9.2012, CD-ROM*

Fath, K.<sup>57</sup>; Wilson, H. R.; Mende, S.; Kuhn, T.; Stengel, J.<sup>57</sup>;  
Schultmann, F.<sup>57</sup>

»Impact of Semitransparent Building-Integrated Photovoltaics on Building Life-Cycle Cost«, in: *Proceedings, 3<sup>rd</sup> International Association for Life-Cycle Civil Engineering 2012, Vienna, Austria, 3.-6.10.2012, CD-ROM*

Fellmeth, T.; Greulich, J.; Clement, F.; Biro, D.

»Modelling of Silicon Solar Cells by Using an Extended Two-Diode-Modell Approach«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Fertig, F.; Krauß, K.; Geismeyer, I.; Broisch, J.; Höffler, H.; Odden, J. O.<sup>26</sup>; Soiland, A. K.<sup>26</sup>; Rein, S.

»Fully Solderable Large-Area Screen-Printed Al-BSF p-Type MC-Si Solar Cells from 100% Solar Grade Feedstock Yielding > 17 %: Challenges and Potential on Cell and Module Level«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Fey, S.; Benoit, P.; Rohbogner, G.; Christ, A. H.

»Device-to-Device Communication for Smart Grid Devices«, in: *Proceedings, PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT) 2012, Berlin, Germany, 14.-17.10.2012, CD-ROM*

Fischer, S.; Steinkemper, H.; Krämer, K.<sup>17</sup>; Goldschmidt, J.

»Concepts to Enhance the Efficiency of Upconversion for Solar Application«, in: *Proceedings, SPIE Photonics Europe 2012, Brussels, Belgium, 16.-19.4.2012*

Flarup Jensen, K.; Veurman, W.; Brandt, H.; Bialecka, K.; Sarker, S.<sup>16</sup> ;  
Rahman, M. M.<sup>16</sup>; Im, C.<sup>58</sup>; Hinsch, A.; Lee, J.-J.<sup>58</sup>

»Photospectroscopy of I3-Species in Dye Solar Cells (DSC) as a Test for the Sealing and Diffusion Barrier Properties of Glass Frit«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Fleissner, D.; Götz, S.; Winter, T.

»Modellierung der Eigennutzungsquote durch gemeinschaftliche Nutzung von PV-Strom«, in: *Proceedings, 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 29.2.-2.3.2012, CD-ROM*

Fleissner, D.; Götz, S.; Winter, T.

»Different Household Load Profiles as a Means to Increase Direct Electricity Consumption from PV-Systems«, in: *Proceedings, 5<sup>th</sup> International Conference on Integration of Renewable and Distributed Resources 2012, Berlin, Germany, 4.-6.12.2012, CD-ROM*

Fluri, T.; Lude, S.; Lam, J.; Morin, G.<sup>71</sup>; Paul, C.<sup>71</sup>; Platzer, W.

»Optimization of Live Steam Properties for a Linear Fresnel Power Plant«, in: *Proceedings, Solar Paces 2012, Marrakesh, Morocco, 11.-14.9.2012, CD-ROM*

## SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Frank, J.; Rüdiger, M.; Fischer, S.; Goldschmidt, J. C.; Hermle, M.  
»Optical Simulation of Bifacial Solar Cells«, in: *Energy Procedia*,  
2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012,  
Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012, pp. 300-35  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.7.067>)
- Füldner, G.; Frazzica, A.<sup>14</sup>; Sapienza, A.<sup>14</sup>; Freni, A.<sup>14</sup>; Schnabel, L.  
»Adsorption Kinetics Measurements of Adsorbent Coatings for the  
Use in Adsorption Chillers and Heat Pumps«, in: *Proceedings*,  
Heat Powered Cycles 2012, Alkmaar, The Netherlands, 10.-12.9.2012,  
CD-ROM
- Füldner, G.; Laurenz, E.; Schwamberger, V.<sup>57</sup>; Schmidt, F. P.<sup>57</sup>;  
Schnabel, L.  
»Simulation of Adsorption Cycles in Adsorption Heat Pumps:  
Detailed Heat and Mass Transfer Compared to Lumped Parameter  
Modelling«, in: *Proceedings*, Heat Powered Cycles Conference 2012,  
Alkmaar, The Netherlands, 10.-12.9.2012, CD-ROM
- Geimer, K.; Kramer, K.; Rehfeldt, M.  
»Mechanical Load Tests For Solar Thermal Collectors«,  
in: *Proceedings*, Eurosun 2012, Rijeka, Croatia, 18.-20.9.2012
- Geisemeyer, I.; Fertig, F.; Warta, W.; Rein, S.; Schubert, M. C.  
»Impact of Reverse Breakdown in Shaded Silicon Solar Cells on  
Module Level: Simulation and Experiment«, in: *Proceedings*,  
27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition  
EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012
- Gerstmaier, T.<sup>80</sup>; van Riesen, S.<sup>80</sup>; Schulz-Gericke, J.<sup>80</sup>; Gombert, A.<sup>80</sup>;  
Behrendt, T.<sup>12</sup>; Lorenz, E.<sup>12</sup>; Steiner, M.; Schachtner, M.; Siefert, G.;  
Bett, A. W.  
»Spectrally Resolved DNI Measurements: Results of a Field Compari-  
son of Spectrometers, Isotope Cells and the SOLIS Satellite Model«,  
in: *Proceedings*, CPV-8 2012, Toledo, Spain, 16.-18.4.2012
- Gerteisen, D.; Markötter, H.<sup>38</sup>; Alink, R.; Tötze, C.<sup>38</sup>; Dittmann, K.<sup>38</sup>;  
Krüger, P.<sup>99</sup>; Haußmann, J.<sup>99</sup>; Klages, M.<sup>99</sup>; Scholta, J.<sup>99</sup>;  
Riesemeier, H.<sup>11</sup>; Gerteisen, D.; Banhart, J.<sup>38</sup>; Manke, J.<sup>38</sup>  
»Investigation of Fuel Cell Materials and Liquid Water Transport  
by Means of Synchrotron Imaging«, in: *ECS Transactions*,  
221<sup>st</sup> ECS Meeting 2012, Seattle, WA, USA, 6.-10.5.2012, pp. 322
- Glunz, S. W.  
»High-Efficiency Cells«, in: *Proceedings*, 22<sup>nd</sup> Workshop on  
Crystalline Silicon Solar Cells & Modules 2012, Vail, CO, USA,  
22.-25.7.2012, pp. 1
- Gölz, S.; Götz, K.<sup>45</sup>; Klobasa, M.<sup>37</sup>; Schleich, J.<sup>37</sup>; Sunderer, G.<sup>45</sup>  
»Führt Verbrauchsfeedback zu Stromeinsparungen? – Schluss-  
folgerungen aus dem Projekt »Intelliekon««, in: *et Energie-  
wirtschaftliche Tagesfragen*, 8 (2012), pp. 32-35
- Graf, W.  
»Coating for Vacuum Tubes«, in: *Proceedings*, 3<sup>rd</sup> SMEThermal 2012,  
Berlin, Germany, 7.2.2012
- Greulich, J.; Wöhrle, N.; Glatthaar, M.; Rein, S.  
»Optical Modeling of the Rear Surface Roughness of Passivated  
Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings*, 2<sup>nd</sup> International Conference on  
Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012
- Groß, F.; Koschikowski, J.; Düver, D.; Martin, R.; Rebecca, S.;  
Winter, D.  
»Membrane Distillation: Basic Considerations and Pilot  
Applications«, in: *Proceedings*, Aachner Membran Kolloquium 2012,  
Aachen, Germany, 7./8.11.2012, CD-ROM
- Gschwander, S.; Schossig, P.  
»Wärme- und Kältespeicher in Gebäuden – mit neuen Materialien  
den Energieverbrauch senken«, in: *Proceedings*, Energie Geladen  
2012, Freiburg, Germany, 31.10.2012
- Gutmann, J.; Posdziech, J.; Peters, M.; Steidl, L.<sup>50</sup>; Zentel, R.<sup>50</sup>;  
Zappe, H.<sup>19</sup>; Goldschmidt, J.  
»Emission of Rhodamine B in PMMA Opals für Luminescent Solar  
Concentrators«, in: *Proceedings*, Photonics Europe 2012, Brussels,  
Belgium, 16.-19.4.2012
- Hahnel, U. J.; Benoit, P.; Gölz, S.; Kohrs, R.; Spada, H.<sup>43</sup>  
»Methoden zur Bestimmung des Nutzereinflusses auf eine  
intelligente Integration von Elektrofahrzeugen in das zukünftige  
Energienetz«, in: *Proceedings*, Smart Grid – Intelligente Energiever-  
sorgung der Zukunft 2012, Stuttgart, Germany, 5./6.11.2012



Haunschild, J.; Broisch, J.; Reis, I.; Rein, S.

»Cz-Silicon Wafers in Solar Cell Production: Efficiency-Limiting Defects and Material Quality Control«, in: *PV International*, 15 (2012)

Hauser, H.; Mellor, A.<sup>93</sup>; Guttowski, A.; Wellens, C.; Benick, J.; Müller, C.<sup>19</sup>; Hermle, M.; Bläsi, B.

»Diffractive Backside Structures via Nanoimprint Lithography«, in: *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Hauser, H.; Michl, B.; Walk, C.; Eisenlohr, J.; Benick, J.; Mellor, A.<sup>93</sup>; Müller, C.<sup>19</sup>; Hermle, M.; Bläsi, B.

»Full-Wafer Roller-Nil Processes for Silicon Solar Cell Texturisation«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Heinz, F.; Warta, W.; Schubert, M. C.

»Optimizing Micro Raman and PL Spectroscopy for Solar Cell Technological Assessment«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012, pp. 28-213*  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.7.053>)

Henning, H.-M.

»Solar Systems for Heating and Cooling of Buildings«, in: *Proceedings, Sustainable Energy ISE Annual Conference 2012, Malta, 21.2.2012, CD-ROM*

Henning, H.-M.

»Solar Heating and Air-Conditioning of Buildings«, in: *Proceedings, 1<sup>st</sup> International Solar Heating & Cooling Conference 2012, San Francisco, CA, USA, 10.-12.7.2012, CD-ROM*

Henning, H.-M.

»Vom Niedrigenergiehaus zum Effizienzhaus Plus: Produktentwicklung und -integration«, in: *Proceedings, dena-Energieeffizienz-kongress 2012, Berlin, Germany, 18./19.9.2012*

Henning, H.-M.; Palzer, A.

»100% Renewables for Electricity and Heat – a Holistic Model for a Future German Energy System«, in: *Proceedings, 7<sup>th</sup> International Renewable Energy Storage Conference 2012, Berlin, Germany, 12.-14.3.2012, CD-ROM*

Hensel, A.; Faulhaber, F.; Kranzer, D.

»Application of Gallium Nitride Transistors in Power Electronics for PV Systems«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Hensel, A.; Wilhelm, C.

»Application of a New 600 V GaN Transistor in Power Electronics for PV Systems«, in: *Proceedings, 15<sup>th</sup> EPE-PEMC 2012 ECCE Europe, Novi Sad, Serbia, 4.-6.9.2012*

Hermann, M.

»Kollektorkonzepts jenseits des Standes der Technik – Möglichkeiten und Herausforderungen«, in: *Proceedings, 10. Gleisdorf Solar 2012 2012, Gleisdorf, Austria, 12.-14.9.2012, CD-ROM*

Hermann, M.; Steinbach, F.<sup>46</sup>; Witulski, J.<sup>46</sup>; Tekkaya, A. E.<sup>46</sup>

»Erfahrungen und Ergebnisse aus der Entwicklung von Stahlabsorbern«, in: *Proceedings, 22. Symposium Thermische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 9.-11.5.2012, CD-ROM*

Herter, B.; Fischer, S.; Bläsi, B.; Goldschmidt, J.

»Effects of Photonic Structures on Upconversion«, in: *Proceedings, Photonics Europe 2012, Brussels, Belgium, 16.-19.4.2012*

Herter, B.; Peters, M.; Janz, S.; Hermle, M.; Goldschmidt, J. C.

»Photonic Structures for a Solar Cell-Upconversion-System«, in: *Future Photovoltaics, 6 (2012)*

Heß, S.; Oliva, A.; Helmke, A.; Stryi-Hipp, G.; Platzer, W.

»Ergebnisse des IEE-Projekts SO-PRO: Auslegung von Solaranlagen für vier ausgewählte industrielle Prozesse«, in: *Proceedings, 22. Symposium Thermische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 9.-11.5.2012, CD-ROM*

## SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Höffler, H.; Haunschild, J.; Zeidler, R.; Rein, S.

»Statistical Evaluation of a Luminescence-Based Imaging Method«, in: *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Höhn, O.; Peters, M.; Bläsi, B.; Zilk, M.; Ulbrich, C.; Hoffmann, A.

»Combination of Angularly Selective Photonic Structures and Concentration Solar Cell System«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Höhn, O.; Peters, M.; Hoffmann, A.<sup>29</sup>; Bläsi, B.; Ulbrich, C.<sup>29</sup>; Schwarz, U.<sup>31</sup>

»Optimization of Angularly Selective Photonic Filters for Concentrator Photovoltaic«, in: *Proceedings, Photonics Europe 2012, Brussels, Belgium, 16.-20.4.2012*

Hollinger, R.; Hamperl, S.; Erge, T.; Wille-Hausmann, B.; Wittwer, C.

»Simulating the Optimized Participation of Distributed Controllable Generators at the Spot Market for Electricity Considering Prediction Errors«, in: *Proceedings, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies ISGT Europe 2012, Berlin, Germany, 14.-17.10.2012, CD-ROM*

Hülsmann, P.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.; Heck, M.

»Numerische Simulation der Feuchtebelastung von PV-Modulen für unterschiedliche Klimastandorte«, in: *Proceedings, Jahrestagung der GUS 2012, Stutensee-Blankenloch, Germany, 14.-16.3.2012, CD-ROM*

Impera, D.; Bivour, M.; Michl, B.; Schubert, M. C.; Hermle, M.

»Characterization of Silicon Heterojunctions on Multicrystalline Absorbers Using Injection-Dependent Photoluminescence Imaging«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012, pp. 280-286*  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.7.064>)

Jäger, U.; Mack, S.; Wufka, C.; Wolf, A.; Biro, D.; Nekarda, J.; Preu, R.

»Selective Emitters in Passivated Emitter and Rear Silicon Solar Cells Enabling 20% on Large Area p-Type Silicon«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Jäger, U.; Wolf, A.; Steinhauser, B.; Benick, J.; Nekarda, J.; Preu, R.

»Laser Doping for High Efficiency Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, SPIE Optics and Photonics 2012, San Diego, CA, USA, 12.-16.8.2012*

Jantsch, M.; Dirnberger, D.; Neuberger, F.

»Optimized Procedures for Representative Samples from PV Module Batches«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Janz, S.; Lindekugel, S.; Pavlovic, R.; Schillinger, K.; Rachow, T.; Reber, S.

»High Quality Silicon Films from Halogen Lamp Melting for New Thin-Film Solar Cell and Module Concepts«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Jeurink, J.; von Morzè, N.; Kroely, L.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Inline Microwave-Excited Plasma Deposition of Thin Amorphous Silicon Layers«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Kafle, B.; Kühnhold, S.; Beyer, W.<sup>29</sup>; Lindekugel, S.; Saint-Cast, P.; Hofmann, M.; Rentsch, J.

»Thermal Stability Investigations of PECVD AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Films Discussing a Possibility of Improving Surface Passivation by Re-Hydrogenation after High Temperature Processes«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Kalio, A.; Olweya, S.; Leibinger, M.; Glatthaar, M.; Wilde, J.<sup>19</sup>

»Study of Sintering Behavior of Silver Front Side Metallization Pastes«, in: *Proceedings, 38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC 2012, Austin, TX, USA, 3.-8.6.2012*

Kaltenbach, T.; Kurth, M. R.; Schmidt, C.; Meier, T.; Köhl, M.; Weiß, K.-A.

»Ageing Tests with Components for Solar Thermal Collectors«, in: *Proceedings, International Conference Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry SHC 2012, San Francisco, CA, USA, 9.-11.7.2012, CD-ROM*

Kaltenbach, T.; Schmidt, C.; Weiß, K.-A.; Meier, T.; Heck, M.; Köhl, M.  
 »Aging Tests for Solar Thermal Collectors and Components Exposed to Outdoor Weathering with Different Climatic Conditions and Accelerated Weathering Tests«, in: *Proceedings, Gleisdorf Solar 2012, Gleisdorf, Austria, 12.-14.9.2012*

Kalz, D.; Burggraf, P.<sup>40</sup>; Sikorski, E.<sup>40</sup>  
 »Energetische Analyse von Nichtwohngebäuden im Bestand«, in: *BHKS-Almanach, (2012), pp. 70-73*

Kalz, D.; Fischer, M.; Pfafferoth, J.<sup>40</sup>; Melcher, M.<sup>21</sup>  
 »Energetische Sanierung einer Druckerei: Kühlen und Heizen mit Umweltenergie in Kombination mit thermoaktiven Bauteilsystemen«, in: *EnEV im Bestand, 9 (2012), pp. 14-23*

Kalz, D.; May-Ostendorf, P. T.<sup>18</sup>; Henze, G. P.<sup>18</sup>; Rajagopalan, B.<sup>18</sup>; Fischer, M.; Mehnert, J.  
 »Experimental Investigation of Model Predictive Control-Based Rules for a Radiantly Cooled Office«, in: *Proceedings, Intelligent Buildings and Advanced Control Techniques, COBEE Conference 2012, Boulder, CO, USA, 8.3.2012, CD-ROM*

Kalz, D.; Winiger, S.; Fischer, M.  
 »Energetische Betriebsanalyse von erdgekoppelten Wärmepumpen für die Wärme- und Kälteversorgung von Nichtwohngebäuden«, in: *Proceedings, Klimatechnik und Wärmepumpen 2012, Würzburg, Germany, 21.-23.11.2012, CD-ROM*

Keding, R.; Rothhardt, P.; Roters, C.; Fallisch, A.; Hohage, S.; Hofmann, M.; Woehl, R.; Borchert, D.; Biro, D.  
 »Silicon Doping Performed by Different Diffusion Sources Aiming Co-Diffusion«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Kick, C.; Thaidigsmann, B.; Linse, M.; Clement, F.; Wolf, A.; Biro, D.  
 »Printed Fire-Through Contacts (FTC) – An Alternative Approach for Local Rear Contacting of Passivated Solar Cells«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Kimmerle, A.; Rüdiger, M.; Wolf, A.; Hermle, M.; Biro, D.  
 »Validation of Analytical Modelling of Locally Contacted Solar Cells by Numerical Simulations«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Koch, L.; Hermann, M.; Bauch, M.  
 »Investigation of New Integrated Solar Thermal Absorbers by Means of a 2-D Model«, in: *Proceedings, Eurosun 2012, Rijeka, Croatia, 18.-20.9.2012, CD-ROM*

Köhl, M.; Weiß, K.-A.; Saile, S.  
 »Solarkollektoren aus Polymeren: EU FP7 Projekt SCOOP«, in: *Proceedings, 22. Symposium Thermische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 9.-11.5.2012*

Kost, C.; Flath, C.<sup>57</sup>; Möst, D.<sup>85</sup>; Fluri, T.  
 »CSP Storage Design and Market Value in an Export Case«, in: *Proceedings, SolarPACES Conference 2012, Marrakesh, Morocco, 11.-14.9.2012, pp. 38-39*

Kost, C.; Thomsen, J.; Schlegl, T.  
 »Market Entrance of PV Industry in Emerging Markets«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012, CD-ROM*

Krauß, K.; Fertig, F.; Kohn, N.; Rauer, M.; Woehl, R.; Rein, S.  
 »Influence of Parasitic Plasma Wrap-Around During Anti-Reflective Coating Deposition on the Formation of an Aluminium Back Surface Field«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Krugl, G.; Wolke, W.; Wagner, F.; Rentsch, J.; Preu, R.  
 »Sputtered Aluminium Oxide for Rear Side Passivation of p-Type Silicon Solar Cells«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

## SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Kühnhold, S.; Kafle, B.; Saint-Cast, P.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Impact of Thermal Treatment on PECVD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Passivation Layers«, in: *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Kurth, M. R.; Schuldis, D.; Kaltenbach, T.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.

»Untersuchung von Anti-Soiling Beschichtung für die Solarindustrie«, in: *Proceedings, 22. Symposium Thermische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 9.-11.5.2012*

Laukamp, H.; Bopp, G.; Grab, R.; Philipp, S.; Schmidt, H.; Reil, F.<sup>92</sup>; Sepanski, A.<sup>92</sup>; Thiem, H.<sup>9</sup>; Vaassen, W.<sup>92</sup>; Häberlin, H.<sup>7</sup>; von Heeckeren, B.<sup>7</sup>

»Sind PV-Anlagen brandgefährlich? – Mythen und Fakten«, in: *Proceedings, 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 29.2.-2.3.2012, CD-ROM*

Lindekugel, S.; Rachow, T.; Janz, S.; Reber, S.

»Intermediate Layer and Back Surface Field Optimisations for the Recrystallised Wafer Equivalent«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Lohmüller, E.; Hendrichs, M.; Thaidigsmann, B.; Eitner, U.; Clement, F.; Wolf, A.; Biro, D.; Preu, R.

»Current Status of MWT Silicon Solar Cell and Module Technology«, in: *PV International, 17 (2012)*

Lohmüller, E.; Thaidigsmann, B.; Werner, S.; Clement, F.; Wolf, A.; Biro, D.; Preu, R.

»Evaluation of Via Pastes for p- and n-Type Metal Wrap through (MWT) Solar Cells«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Löper, P.; Canino, M.<sup>13</sup>; López-Vidrier, J.<sup>65</sup>; Schnabel, M.; Witzky, A.; Belletato, M.<sup>13</sup>; Allegranza, M.<sup>13</sup>; Hiller, D.<sup>19</sup>; Hartel, A.<sup>19</sup>; Gutsch, S.<sup>19</sup>; Hernández, S.<sup>65</sup>; Hernández, S.<sup>65</sup>; Guerra, R.<sup>94</sup>; Ossicini, S.<sup>94</sup>; Garrido, B.<sup>65</sup>; Janz, S.; Zacharias, M.<sup>19</sup>

»Silicon Quantum Dots in Photovoltaic Devices: Device Fabrication, Characterization and Comparison of Materials«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Löper, P.; Pysch, D.<sup>76</sup>; Richter, A.; Hermle, M.; Janz, S.; Zacharias, M.<sup>19</sup>; Glunz, S. W.

»Analysis of the Temperature Dependence of the Open-Circuit Voltage«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012, pp. 135-142*  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.7.041>)

Löper, P.; Witzky, A.; Hartel, A.<sup>19</sup>; Gutsch, S.<sup>19</sup>; Hiller, D.<sup>19</sup>; Goldschmidt, J. C.; Janz, S.; Glunz, S. W.; Zacharias, M.<sup>19</sup>

»Photovoltaic Properties of Silicon Quantum Dots in Dielectric Matrices«, in: *Proceedings, SPIE Photonics OPTO 2012, San Francisco, CA, USA, 21.-26.1.2012*

Mack, S.; Wolf, A.; Werner, S.; Dubè, C. E.<sup>2</sup>; Bhosle, V.<sup>2</sup>; Biro, D.

»Synergistic Use of Ion Implant Annealing Processes for Thermal Oxide Rear Surface Passivation«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Martínez, M.<sup>54</sup>; Rubio, F.<sup>54</sup>; Sala, G.<sup>53</sup>; Pachón, D.<sup>53</sup>; Bett, A. W.; Siefert, G.; Vetter, M.; Schies, A.; Wachtel, J.; Gombert, A.<sup>80</sup>; Wüllner, J.<sup>80</sup>; Wüllner, J.<sup>80</sup>; Díaz, V.<sup>55</sup>; Vázquez, M. A.<sup>55</sup>; Abulfotuh, F.<sup>70</sup>; Fetyan, K.<sup>70</sup>; el Moussaoui, A.<sup>72</sup>; Mansouri, S.<sup>72</sup>; Loudiyi, K.<sup>4</sup>; Darhmaoui, H.<sup>4</sup>; Mrabti, T.<sup>4</sup>

»CPV Plants Data Analysis. ISFOC and NACIR Projects Results«, in: *Proceedings, CPV-8 2012, Toledo, Spain, 16.-19.4.2012*

Maurer, C.; Pflug, T.; Di Lauro, P.; Hafner, J.<sup>79</sup>; Knez, F.<sup>79</sup>; Jordan, S.<sup>79</sup>; Hermann, M.; Kuhn, T. E.

»SHC with Transparent Façade Collectors in a Demo Building«, in: *Energy Procedia, International Conference Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry SHC 2012, San Francisco, CA, USA, 9.-11.7.2012, CD-ROM*

Max, J.; Philipp, S.; Schwunk, S.

»Battery Management in Hybrid Battery Systems up to 1200 V«, in: *Proceedings, IRES 2012, Berlin, Germany, 12.-14.11.2012, CD-ROM*



Michl, B.; Schön, J.; Schindler, F.; Warta, W.; Schubert, M.

»Reducing the Impact of Iron on Carrier Lifetimes in Multicrystalline Silicon Wafers by Optimized Diffusion Temperature Profiles«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Mierau, M.; Kohrs, R.; Wittwer, C.

»A Distributed Approach to the Integration of Electric Vehicles into Future Smart Grids«, in: *Proceedings, Innovative Smart Grid Technology 2012, Berlin, Germany, 14.-17.10.2012*

Milenkovic, N.; Rachow, T.; Heinz, F.; Reber, S.; Janz, S.

»Simulation and Characterization of Epitaxial n- and p-Type Emitters on Silicon Wafer Solar Cells«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Morgenstern, A.

»Kühlen mit der Sonne – Technik die sich bewährt hat«, in: *Proceedings, Energie Geladen 2012, Freiburg, Germany, 31.10.2012*

Morrison, D.<sup>67</sup>; Devenport, S.<sup>67</sup>; Heasman, K.<sup>67</sup>; Schmiga, C.; Glatthaar, M.

»Development of Rear Passivated Laser Grooved Buried Contact (LGBC) Laser Fired Contact (LFC) Silicon Solar Cells Using Thin Wafers«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Munz, G.; Bongs, C.; Morgenstern, A.; Lehmann, S.; Kummer, H.; Henning, H.-M.; Henninger, S. K.

»A Novel Dehumidification and Cooling System Driven by an Evacuated Tube Solar Air Collector«, in: *Proceedings, Heat Powered Cycles 2012, Alkmaar, The Netherlands, 10.-12.9.2012, CD-ROM*

Nesswetter, H.<sup>23</sup>; Lugli, P.<sup>49</sup>; Bett, A. W.; Zimmermann, C. G.<sup>23</sup>

»Electro- and Photoluminescence Characterization of Multi-Junction Solar Cells«, in: *Proceedings, 38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC 2012, Austin, TX, USA, 3.-8.6.2012*

Nievendick, J.; Stocker, M.; Specht, J.; Glover, W.; Zimmer, M.; Rentsch, J.

»Application of the Inkjet-Honeycomb-Texture in Silicon Solar Cell Production«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Nold, S.; Voigt, N.; Friedrich, L.; Weber, D.; Hädrich, I.; Mittag, M.; Wirth, H.; Thaidigsmann, B.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Cost Modelling of Silicon Solar Cell Production Innovation along the PV Value Chain«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Palzer, A.; Westner, G.<sup>22</sup>; Madlener, R.<sup>48</sup>

»Evaluation of Different Hedging Strategies for Commodity Price Risks of Industrial Cogeneration Plants«, in: *Proceedings, ENERDAY 2012, Dresden, Germany, 28.4.2012*

Palzer, A.; Westner, G.<sup>22</sup>; Madlener, R.<sup>48</sup>

»Evaluation of Different Hedging Strategies for Commodity Price Risks of Industrial Cogeneration Plants«, in: *FCN Working Paper, 2 (2012)*

Pavlovic, R.; Janz, S.; Janz, S.

»Integrated Interconnection of Crystalline Silicon Thin Film Solar Cells«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Peike, C.; Kaltenbach, T.; Weiß, K.-A.; Köhl, M.

»Indoor vs. Outdoor Aging-Polymer Degradation in PV Modules Investigated by Raman Spectroscopy«, in: *Proceedings, SPIE Optics and Photonics 2012, San Diego, CA, USA, 12.-16.8.2012*

Philipps, S. P.

»III-V Mehrfachsolarzellen für die konzentrierende Photovoltaik«, in: *Proceedings, Woche der Umwelt 2012, Berlin, Germany, 5.16.6.2012*

Philipps, S.; Bett, A.

»High-Efficiency Solar Cell Architectures Based on III-V Semiconductor Materials«, in: *Proceedings, Korea-EU International Symposium on Photovoltaics 2012, Busan, Republic of Korea, 21.11.2012, CD-ROM*

## SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Philipps, S.; Bett, A.; Glunz, S.

»Development of Advanced PV Technologies in Germany«, in: *Proceedings, 2<sup>nd</sup> German-Japanese Solar Day 2012, Tokyo, Japan, 13.11.2012*

Piekarczyk, A.; Peike, C.; Kaltenbach, T.; Weiß, K.-A.

»Charakterisierung und Qualifizierung von Kunststoffmaterialien für Solarthermische Anwendungen«, in: *Proceedings, Gleisdorf Solar 2012, Gleisdorf, Austria, 12.-14.9.2012*

Pospischil, M.; Specht, J.; Gentischer, H.; König, M.<sup>39</sup>; Hoerteis, M.<sup>39</sup>; Mohr, C.<sup>39</sup>; Zengerle, R.<sup>19</sup>; Clement, F.; Biro, D.

»Correlations between Finger Geometry and Dispensing Paste Rheology«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Rachow, T.; Ledinsky, M.; Fejfar, A.; Janz, S.; Reber, S.

» $\mu$ c-Si Solar Cells by Direct Deposition with APCVD«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Rachow, T.; Milenkovic, N.

»Formation of High Efficiency Epitaxial Emitters by APCVD«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Réhault, N.; Kalz, D.

»Ongoing Commissioning of a High Efficiency Supermarket with a Ground Coupled Carbon Dioxide Refrigeration Plant«, in: *Proceedings, International Conference for Enhanced Building Operations, Manchester, Great Britain, 23.-26.10.2012*

Reich, N.; Goebel, A.; Dirnberger, D.; Kiefer, K.

»System Performance Analysis and Estimation of Degradation Rates Based on 500 Years of Monitoring Data«, in: *Proceedings, 38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC 2012, Austin, TX, USA, 3.-8.6.2012, CD-ROM*

Reitenbach, V.; Spitz, M.; Drews, A.; Weiß, M.; Ould Chighali, E.; Thaidigsmann, B.; Lohmüller, E.; Knorz, A.; Clement, F.; Wolf, A.; Biro, D.; Preu, R.

»Process Characterisation of MWT Solar Cells – a new Method to Analyse Via Contacts«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Rentsch, J.; Ackermann, R.; Kästner, G.; Schwab, C.; Zimmer, M.; Preu, R.

»Challenges for Single Chemical Processing«, in: *PV International, 16 (2012)*

Richter, A.; Souren, F. M.<sup>82</sup>; Schuldis, D.; Görtzen, R. M.<sup>82</sup>; Benick, J.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Thermal Stability of Spatial ALD Deposited  $Al_2O_3$  Capped by PECVD  $SiN_x$  for the Passivation of Lowly- and Highly-Doped p-Type Silicon Surfaces«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Richter, A.; Werner, F.<sup>44</sup>; Cuevas, A.<sup>77</sup>; Schmidt, J.<sup>44</sup>; Glunz, S. W.

»Improved Parameterization of Auger Recombination in Silicon«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012, (online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.7.34>)*

Rochlitz, L.; Burhenne, L.; Lintner, C.; Aicher, T.

»Das BioSyn-Verfahren – Biomassevergasung zur Erzeugung eines teerfreien Synthesegases«, in: *Proceedings, Fachtagung Konversion von Biomassen 2012, Rotenburg/Fulda, Germany, 19.-21.3.2012, pp. 95-100*

Rogalla, S.

»Central Inverters«, in: *Proceedings, Power Electronics for Photovoltaics 2012, Munich, Germany, 12.6.2012, pp. 183-201*

Rogalla, S.

»Three Phase String Inverters«, in: *Proceedings, Power Electronics for Photovoltaics 2012, Munich, Germany, 12.6.2012, pp. 127-146*

Rogalla, S.; Blume, S.; Burger, B.; Reichert, S.; Siedle, C.

»Verbesserter Ansatz zur Bestimmung der Oberschwingungsemissionen von Zentralwechselrichtern«, in: *Proceedings, 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 29.2.-2.3.2012*, pp. 389-394

Rohbogner, G.; Fey, S.; Hahnel, U.; Benoit, P.; Wille-Hausmann, B.

»What the Term Agent Stands for in the Smart Grid«, in: *Proceedings, IEEE Federated Conference on Computer Science and Information, Breslau, Poland, 9.-12.9.2012, CD-ROM*

Roth, W.; Placha, H.; Reichert, S.; Reiners, F.; Schwunk, S.; Wittwer, C.

»Firmendarstellung für das 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie«, in: *Proceedings, 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 29.2.-2.3.2012, CD-ROM*

Rothhardt, P.; Stoffels, T.; Keding, R.; Belledin, U.; Wolf, A.; Biro, D.

»Control of Phosphorus Doping Profiles for Co-Diffusion Processes«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Rühle, K.; Glunz, S.; Kasemann, M.<sup>19</sup>

»Towards New Design Rules for Indoor Photovoltaic Cells«, in: *Proceedings, 38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC 2012, Austin, TX, USA, 3.-8.6.2012*, pp. 02588-02591

Rühle, K.; Rauer, M.; Kasemann, M.<sup>19</sup>

»Passivation Layers for Indoor Solar Cells«, in: *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*, pp. 46-411

Ruschenburg, J.; Herkel, S.

»A Comparative Analysis of Market Available Solar Thermal Heat Pump Systems«, in: *Proceedings, EuroSun 2012, Rijeka, Croatia, 18.-20.9.2012, CD-ROM*

Ruschenburg, J.; Palzer, A.; Günther, D.; Miara, M.

»Solare Wärmepumpensysteme in Einfamilienhäusern – Eine modellbasierte Analyse von Feldtestdaten«, in: *Proceedings, 22. Symposium Thermische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 9.-11.5.2012*

Sabo, A.; Wille-Hausmann, B.; Wittwer, C.

»Betriebsstrategien für PV-Batteriesysteme im Stromnetz/Operation Strategies for PV Battery Systems in the Electricity Grid«, in: *Proceedings, Smart Grid – Intelligente Energieversorgung 2012, Stuttgart, Germany, 5.16.11.2012*

Saint-Cast, P.; Hofmann, M.; Kühnhold, S.; Kania, D.<sup>8</sup>; Weiss, L.<sup>98</sup>;

Heo, Y.-H.<sup>60</sup>; Billot, E.; Olwal, P.<sup>8</sup>; Trogus, D.; Rentsch, J.; Preu, R. »A Review of PECVD Aluminium Oxide for Surface Passivation«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Saint-Cast, P.; Hofmann, M.; Kühnhold, S.; Nekarda, J.; Preu, R.

»Recombination on Locally Processed Wafer Surfaces«, in: *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Scherff, M.<sup>75</sup>; Ballmann, T.<sup>75</sup>; Müller, J. W.<sup>75</sup>; Antonelli, D.<sup>27</sup>;

Busto, C.<sup>27</sup>; Grasso, F.<sup>27</sup>; Ferrazza, F.<sup>2</sup>; Tonelli, E.<sup>2</sup>; Baert, K.<sup>73</sup>; Duerinckx, F.<sup>73</sup>; Cacciato, A.<sup>73</sup>; Oswald, W.<sup>63</sup>

»The European Project 20Pl $\mu$ S: 20 Percent Efficiency On Less Than 100  $\mu$ M Thick Industrially Feasible Crystalline-Si Solar Cells«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Schick Tanz, M.

»Influencia de las Fluctuaciones de Temperatura en el Comportamiento Operativo de los Enfriadores de Adsorción«, in: *Frio-Calor Aire Acondicionado, 448 (2012)*, pp. 3-8

Schick Tanz, M.; Henning, H.-M.

»Einfluss verschiedener Parameter auf die Vollkosten der thermischen Kälteerzeugung mit Fernwärme«, in: *Kälteerzeugung aus Wärme, AGFW-Merkblatt FW 301 (2012)*

Schillinger, K.; Rachow, T.; Flatten, L.; Janz, S.; Reber, S.

»Investigations on Crystal Quality of Thin Silicon Films Prepared by Zone Melting Recrystallization on Different Intermediate Layers and Cost Effective Substrates«, in: *Proceedings, 6<sup>th</sup> International Workshop on c-Si for Solar Cells, Aix-les-Bains, France, 8.-13.10.2012*

## SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Schillinger, K.; Rachow, T.; Flatten, L.; Janz, S.; Reber, S.

»Thin Silicon Films Prepared by ZMR on Cost Effective Substrates- Influence of the Intermediate Layer of Crystal Quality«, in: Proceedings, 6<sup>th</sup> International Workshop on c-Si for Solar Cells 2012, Aix-les-Bains, France, 8.-13.10.2012

Schmiga, C.; Rauer, M.; Rüdiger, M.; Glatthaar, M.; Glunz, S. W.

»Status and Perspectives on n-Type Silicon Solar Cells with Aluminium-Alloyed Rear Emitter«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Schmitt, P.; Kaiser, P.; Savio, C.; Tränitz, M.; Eitner, U.

»Intermetallic Phase Growth and Reliability of Sn-Ag-Soldered Solar Cell Joints«, in: Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012

Schmitt, P.; Tränitz, M.; Anderson, R.20

»Effect of Durability Testing on Solder Joint Adhesion and Failure Mode of Front Side Metallizations«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012, CD-ROM

Schön, J.; Haarahltonen, A.<sup>1</sup>; Fenning, D.<sup>62</sup>; Bounassisi, T.<sup>62</sup>; Savin, H.<sup>1</sup>; Warta, W.; Schubert, M.

»Modeling the Size Distribution of Iron Precipitates in MC Silicon«, in: Proceedings, 38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC 2012, Austin, TX, USA, 3.-8.6.2012

Schröer, S.; Bivour, M.; Schön, J.; Hermle, M.; Glunz, S. W.

»Reduction of Absorption Losses and Efficiency Gains by Investigating Amorphous/Crystalline SHJ Rear Emitter Solar Cells«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Schubert, M.; Schön, J.; Michl, B.; Abdollahinia, A.; Warta, W.

»Modeling Distribution and Impact of Efficiency Limiting Metallic Impurities in Silicon Solar Cells«, in: Proceedings, 38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC 2012, Austin, TX, USA, 3.-8.6.2012

Schuldis, D.; Richter, A.; Benick, J.; Hermle, M.

»Influence of Different Post Deposition Treatments on the Passivation Quality and Interface Properties of Thermal ALD Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Capped by PECVD SiN<sub>x</sub>«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Schumann, M.; Meyer, S.<sup>30</sup>; Schmid, C.; Haas, F.; Riepe, S.; Cröll, A.<sup>59</sup>

»Impurity Control of Quartz Crucible Coatings for Directional Solidification of Silicon«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Schwab, C.; Wolf, A.; Graf, M.; Nekarda, J.; Kästner, G.; Zimmer, M.; Kühnhold, S.; Hofmann, M.; Preu, R.

»Passivation of Inline Wet Chemically Polished Surfaces for Industrial PERC Devices«, in: Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012

Schwarz, F.<sup>61</sup>; Beckmann, R.<sup>61</sup>; Kohn, N.; Nölker, S.<sup>61</sup>; Kastl, S.<sup>61</sup>; Hofmann, M.; Ferrè, R.<sup>61</sup>; Pernau, T.<sup>61</sup>; Wanka, H.<sup>61</sup>; Rentsch, J.

»Advanced Anti-Reflection and Passivation Layer Systems Produced by High-Power Plasma in the New Manz PECVD System«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Schwunk, S.; Armbruster, N.; Straub, S.; Kehl, J.; Vetter, M.

»Particle Filter for State of Charge and State of Health Estimation for Lithium-Iron Phosphate Batteries«, in: Proceedings, 13. Ulm Electrochemical Talks 2012, Ulm, Germany, 3.-5.7.2012

Seiffe, J.; Nold, S.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Multifunctional PECVD Layers – Cost Analysis of the X-Pert Approach«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Seiffe, J.; Pillath, F.; Trogus, D.; Brand, A.; Savio, C.; Hofmann, M.; Rentsch, J.; Preu, R.

»Multifunctional PECVD Layers: Dopant Source, Passivation and Optics«, in: Proceedings, 38<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference PVSC 2012, Austin, TX, USA, 3.-8.6.2012



Sierra Trillo, M.; Glatthaar, M.; Hopman, S.; Krossing, I.

»Impact of the Solvent Properties on the Morphology of the Silicon Surface Generated by Laser Ablation«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Smolinka, T.

»Water Electrolysis for Hydrogen Production from Renewable Energies«, in: Proceedings, f-cell and battery storage 2012, Stuttgart, Germany, 9.10.2012

Sonner, C.; Oltersdorf, A.; Zimmer, M.; Moldovan, A.; Rentsch, J.

»Investigation of the Cleaning Effects Regarding Organic Contaminants on the Alkaline Texturisation«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Sprenger, W.; Assoa, Y. B.<sup>47</sup>; Zamini, S.<sup>5</sup>; Misara, S.<sup>35</sup>;

Pellegrino, M.<sup>68</sup>; Erleaga, A. A.<sup>86</sup>

»Numerical Analysis of the impact of Environmental Conditions on BIPV Systems, an Overview of BIPV Modelling in the Sophia Project«, Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012, CD-ROM

Sprenger, W.; Wilson, H. R.; Kuhn, T.

»Auswirkung von innerer Verschattung und Temperaturanalyse bei PVSHADE«, in: Proceedings, Bauwerksintegrierte Photovoltaik 2012, Bad Staffelstein, Germany, 28.2.2012, CD-ROM

Spribile, A.; Greulich, J.; Lohmüller, E.; Clement, F.; Specht, J.;

Biro, D.; Preu, R.; Koehler, I.<sup>64</sup>; Doll, O.<sup>64</sup>; Stockum, W.<sup>64</sup>; Tueshaus, C.<sup>64</sup>

»MWT Solar Cell Processing by Use of Isishape<sup>®</sup> Solar Etch<sup>®</sup> SiD for Rear Contact and Edge Isolation«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Steiner, M.; Siefert, G.; Bösch, A.; Hornung, T.; Bett, A. W.

»Realistic Power Output Modeling of CPV Modules«, in: Proceedings, CPV-8 2012, Toledo, Spain, 16.-18.4.2012

Stüwe, D.; Keding, R.; Hahn, D.; Jahn, M.; Fallisch, A.; Clement, F.; Hofmann, M.; Woehl, R.; Biro, D.; Tueshaus, C.<sup>64</sup>; Doll, O.<sup>64</sup>; Doll, O.<sup>64</sup>; Stockum, W.<sup>64</sup>; Koehler, I.<sup>64</sup>

»Inkjet-Printed Diffusion Barrier for Structured Doping Areas from Doped PECVD Silicate Glasses«, in: Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012

Szolak, R.; Aicher, T.; Schlüter, M.; Kovacevic, J.<sup>66</sup>; Hehle, M.<sup>66</sup>

»Aktive Rußpartikelfilterregenerierung mit Kraftstoffdampf und Synthesegas«, in: Proceedings, 7. Internationale MTZ-Fachtagung 2012, Nürnberg, Germany, 6./7.11.2012

Terheiden, B.<sup>95</sup>; Horbelt, R.<sup>95</sup>; Schiele, Y.<sup>95</sup>; Seren, S.<sup>95</sup>; Ebser, J.<sup>95</sup>;

Hahn, G.<sup>95</sup>; Morrison, D.<sup>67</sup>; Heasman, K.<sup>67</sup>; Devenport, S.<sup>67</sup>;

Holman, Z.<sup>24</sup>; Descoedres, A.<sup>24</sup>; De Wolf, S.<sup>24</sup>; Baliff, C.<sup>24</sup>;

Saint-Cast, P.; Michl, B.; Schmiga, C.; Weber, B.; Glunz, S. W.;

Köntopp, M. B.<sup>75</sup>; Thomsen, J.; Kost, C.; Saad, N.; Schlegl, T.

»Developing Local Value Creation in an Emerging CSP Market: The Case of Morocco«, in: Proceedings, SolarPACES Conference 2012 2012, Marrakesh, Morocco, 11.-14.9.2012, pp. 453-454

Vetter, M.

»Battery System Technology – From Cells to Systems«, in: Proceedings, Hybrid & Electric Vehicles Forum 2012, Prague, Czech Republic, 1./2.2.2012, CD-ROM

Vetter, M.

»Battery Systems Development for the Electric Grid«, in: Proceedings, Large Lithium Ion Battery Technology and Application Symposium AABC 2012, Orlando, FL, USA, 6.-10.2.2012, CD-ROM

Vetter, M.

»Batteriespeichertechnologien«, in: Proceedings, PHOTOvoltaik – modernste E-Technik im Einsatz 2012, Vienna, Austria, 19.4.2012, CD-ROM

Vetter, M.

»Dezentrale netzgekoppelte PV-Batteriesysteme«, in: Proceedings, Netzferne Stromversorgung und Photovoltaik 2012, Freiburg, Germany, 17./18.9.2012, CD-ROM

## SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

Vetter, M.

»Hybrides Lithium-Blei-Batteriesystem für die Anwendung in PV-Inselnetzen«, in: *Proceedings, 2. VDI Konferenz Elektrochemische Energiespeicher für stationäre Anwendungen 2012, Ludwigsburg, Germany, 16./17.10.2012, CD-ROM*

Vetter, M.

»Solare Inselssysteme in DC«, in: *Proceedings, Cluster Seminar – Niederspannungs-Gleichstromnetze 2012, Erlangen, Germany, 7./8.11.2012, CD-ROM*

Vetter, M.

»Advanced Battery Solutions for PV Applications«, in: *Proceedings, Intersolar China 2012, Beijing, China, 13.12.2012, CD-ROM*

Vetter, M.; Dennenmoser, M.

»Status and Potential of Redox-Flow Batteries«, in: *Proceedings, Intersolar North America 2012, San Francisco, CA, USA, 9.-12.7.2012, CD-ROM*

Vetter, M.; Dötsch, C.<sup>33</sup>; Würsig, A.<sup>34</sup>; Brettschneider, P.<sup>36</sup>

»Urban Hybrid Energy Storage – Enabling Large-Scale Integration of Renewables«, in: *Proceedings, Intersolar North America 2012, San Francisco, CA, USA, 9.-12.7.2012, CD-ROM*

Vetter, M.; Reiners, F.; Schwunk, S.; Dietrich, V.<sup>56</sup>

»Next Generation of Hybrid PV Mini-Grids«, in: *Proceedings, Intersolar North America 2012, San Francisco, CA, USA, 9.-12.7.2012, CD-ROM*

Vetter, M.; Rohbogner, G.; Dötsch, C.<sup>33</sup>; Würsig, A.<sup>34</sup>; Brettschneider, P.<sup>36</sup>

»Urban Hybrid Energy Storage – An Alternative for Centralized Batteries in the Distribution Grid?«, in: *Proceedings, Solar Summit 2012, Freiburg, Germany, 18./19.10.2012, CD-ROM*

Viennahausen, A. H.; Kranzer, D.

»1 MHz Resonant DC/DC-Converter Using 600 V Gallium Nitride (GaN) Power Transistors«, in: *Proceedings, European Conference on Silicon Carbide & Related Materials ECSCRM 2012, St. Petersburg, Russia, 2.-6.9.2012*

Vorbeck, L.; Gschwander, S.; Thiel, P.<sup>42</sup>; Lüdemann, B.<sup>42</sup>; Schossig, P.  
»Pilot Application of Phase Change Slurry in a 5 m<sup>3</sup> Storage«, in: *Proceedings, Innostock 2012, Lleida, Spain, 15.-18.5.2012, CD-ROM*

Walter, J.; Eberlein, D.; Haunschild, J.; Tranitz, M.; Eitner, U.

»A Method to Detect Defective Solder Joints by Rs-Electroluminescence Imaging«, in: *Proceedings, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012*

Weber, B.; Orellana, T.; Riepe, S.

»Investigations on Breakage and Quality for Thin Slurry Sawn Wafers«, in: *Proceedings, 6<sup>th</sup> International Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells CSSC 2012, Aix-les-Bains, France, 8.-11.10.2012*

Weber, B.; Riepe, S.

»Challenges of the Multi Wire Sawing Process for Thin Wafers below 120µm Thickness«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Weiß, K.-A.; Peike, C.; Piekarczyk, A.

»Kunststoffanwendungen in der Photovoltaik und Niedertemperatur-Solarthermie«, in: *Proceedings, Polyurethan 2012, Nürtingen, Germany, 7./8.11.2012, CD-ROM*

Welz, C.; Di Lauro, P.; Thoma, C.; Richter, J.; Hermann, M.; Stryi-Hipp, G.; Maurer, C.

»Physikalische Modellierung und Simulation sowie detaillierte Vermessung von Luftkollektoren«, in: *Proceedings, 22. Symposium Thermische Solarenergie, Bad Staffelstein, Germany, 9.-11.5.2012, CD-ROM*

Wendling, M. D.; Mondon, A.; Kraft, A.; Bartsch, J.; Glatthaar, M.; Glunz, S. W.

»Analysis of Chemical Stability of Printing Pastes in Electrochemical Plating Solutions«, in: *Energy Procedia, 2<sup>nd</sup> International Conference on Silicon Photovoltaics SiliconPV 2012, Leuven, Belgium, 3.-5.4.2012, pp. 497-52*  
(online available: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egypro.2012.07.100>)

Wiemken, E.; Petry Elías, A. R.; Nienborg, B.; Zachmaier, P.<sup>6</sup>; Safarik, M.<sup>51</sup>; Schmidt, F.<sup>57</sup>; Glück, C.<sup>57</sup>

»EVASOLK - Evaluation of Solar Cooling in Comparison to Reference Technologies«, in: *Proceedings, Eurosun 2012, Rijeka, Croatia, 18.-20.9.2012, CD-ROM*

Wiesenfarth, M.; Helmers, H.; Philipps, S. P.; Steiner, M.; Bett, A. W.  
»Advanced Concepts in Concentrating Photovoltaics (CPV)«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-29.9.2012, pp. 11-15*

Wiesenfarth, M.; Steiner, M.; Helmers, H.; Siefer, G.; Oliva, E.; Dimroth, F.; Shelef, G.<sup>87</sup>; Polonsky, G.<sup>87</sup>; Flitsanov, Y.<sup>87</sup>; Kribus, A.<sup>87</sup>; Bett, A. W.

»Front-Side Interconnected Large Area Concentrator Cells for Compact Concentrator Modules«, in: *Proceedings, CPV-8 2012, Toledo, Spain, 16.-18.4.2012, pp. 24-27*

Wieser, M.; Clement, J.; Benoit, P.; Kohrs, R.; Wittwer, C.  
»A Modular Prototyping Hard- and Software Platform for Faster Development of Intelligent Charging Concepts for Electric Vehicles«, in: *Proceedings, International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives 2012, Istanbul, Turkey, 13.-17.5.2012, CD-ROM*

Wille-Hausmann, B.; Link, J.; Sabo, A.; Wittwer, C.  
»Photovoltaik Eigenstromnutzung – Fluktuation von Strahlung und Last«, in: *Proceedings, 27. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2012, Bad Staffelstein, Germany, 29.2.-2.3.2012, CD-ROM*

Wolf, S.; Herter, B.; Fischer, S.; Höhn, O.; Martín-Rodríguez, R.<sup>97</sup>; Aeberhard, U.<sup>52</sup>; Goldschmidt, J. C.  
»Exploiting Photonic Structures to Improve the Efficiency of Upconversion by Field Enhancement and a Modification of the Local Density of Photonic States«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Wystrcil, D.; Kalz, D.  
»Thermo-Hydraulische Modellierung eines Niedrigexergiesystems zur Gebäudeheizung und -kühlung und exergetische Bewertung von Regelungsstrategien«, in: *Proceedings, BauSIM 2012, Berlin, Germany, 26.-28.9.2012*

Zeidler, R.; Haunschild, J.; Seeber, B.; Riepe, S.; Höffler, H.; Fertig, F.; Reis, I.; Rein, S.

»Tomographic Defect Reconstruction of Multicrystalline Silicon Ingots Using Photoluminescence Images of As-Cut Wafers and Solar Cells«, in: *Proceedings, 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition EUPVSEC 2012, Frankfurt/Main, Germany, 24.-28.9.2012*

Zeidler, R.; Riepe, S.; Seeber, B.; Haunschild, J.; Orellana, T.; Schmid, C.; Rein, S.  
»Tomographic Defect Reconstruction of Multicrystalline Silicon Ingots Using Photoluminescence Images of As-Cut Wafers«, in: *Proceedings, 6th International Workshop on Crystalline Silicon Solar Cells CSSC 2012, Aix-les-Bains, France, 8.-11.10.2012*

Zipf, V.; Neuhäuser, A.; Nitz, P.; Gschwander, S.; Platzer, W.  
»High Temperature Latent Heat Storage for CSP: Testing of First Prototype with Thermal Oil«, in: *Proceedings, Innostock 2012, Lleida, Spain, 15.-18.5.2012, CD-ROM*

<sup>1</sup> Aalto University, Aalto, Finland

<sup>2</sup> Applied Materials, Inc., Gloucester, MA, USA

<sup>3</sup> Asahei-Kasei, Shizuoka, Japan

<sup>4</sup> AUI, Ifrane, Morocco

<sup>5</sup> Austrian Institute of Technology AIT, Vienna, Austria

<sup>6</sup> Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung Bayern ZAE, Garching, Germany

<sup>7</sup> Berner Fachhochschule für Technik und Informatik, Burgdorf, Switzerland

<sup>8</sup> Bosch Solar Energy AG, Erfurt, Germany

<sup>9</sup> Branddirektion München, Munich, Germany

<sup>10</sup> BSQ Solar S. L., Madrid, Spain

<sup>11</sup> Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM, Berlin, Germany

<sup>12</sup> Carl von Ossietzky Universität, Oldenburg, Germany

<sup>13</sup> CNR-Istituto per la Microelettronica e Microsistemi, Bologna, Italy

<sup>14</sup> CNR-Istituto di Tecnologie Avanzate per l'Energia »Nicola Giordano«, Messina, Italy

<sup>15</sup> Daido Steel Co., Nagoya, Japan

<sup>16</sup> Department of Advanced Technology Fusion Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

<sup>17</sup> Department of Chemistry and Biochemistry University of Bern, Bern, Switzerland

<sup>18</sup> Department of Civil Environmental and Architectural

## SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

- Engineering University of Colorado, Boulder, CO, USA
- <sup>19</sup> Department of Microsystems Engineering IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany
- <sup>20</sup> DuPont Microcircuit Materials, Bristol, Great Britain
- <sup>21</sup> E&B engelhardt und bauer Druck und Verlag GmbH, Karlsruhe, Germany
- <sup>22</sup> E.ON Energy Projects GmbH, Munich, Germany
- <sup>23</sup> EADS Astrium GmbH, Munich, Germany
- <sup>24</sup> Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Neuchâtel, Switzerland
- <sup>25</sup> EDF R&D ENERBAT, Moret sur Loing, France
- <sup>26</sup> Elkem Solar AS, Kristiansand, Norway
- <sup>27</sup> Eni S.p.A. Centro Ricerche per le Energie non Convenzionale, Novara, Italy
- <sup>28</sup> Eni S.p.A. Research and Technological Innovation Department, Roma, Italy
- <sup>29</sup> Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany
- <sup>30</sup> Fraunhofer Center for Silicon-Photovoltaics CSP, Halle, Germany
- <sup>31</sup> Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF, Freiburg, Germany
- <sup>32</sup> Fraunhofer Institute for Building Physics IBP, Holzkirchen, Germany
- <sup>33</sup> Fraunhofer Institute for Environmental, Safety, and Energy Technology UMSICHT, Oberhausen, Germany
- <sup>34</sup> Fraunhofer Institute for Silicon Technology ISIT, Itzehoe, Germany
- <sup>35</sup> Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology IWES, Kassel, Germany
- <sup>36</sup> Fraunhofer Institute for Optronics, System Technologies and Image Exploitation AST, Ilmenau, Germany
- <sup>37</sup> Fraunhofer Institute for Systems and Innovation Research ISI, Karlsruhe, Germany
- <sup>38</sup> Helmholtz-Zentrum Berlin HZB, Berlin, Germany
- <sup>39</sup> Heraeus Precious Metals GmbH & Co. KG, Hanau, Germany
- <sup>40</sup> Hochschule für Technik, Wirtschaft und Medien, Offenburg, Germany
- <sup>41</sup> Imperial College of Science, Technology and Medicine ICSTM, London, Great Britain
- <sup>42</sup> Imtech Deutschland GmbH & Co, Hamburg, Germany
- <sup>43</sup> Institut für Psychologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg, Germany
- <sup>44</sup> Institut für Solarenergieforschung Hameln ISFH, Emmerthal, Germany
- <sup>45</sup> Institut für sozial-ökologische Forschung, Frankfurt, Germany
- <sup>46</sup> Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Technische Universität Dortmund, Dortmund, Germany
- <sup>47</sup> Institut National de l'Énergie Solaire INES, Le Bourget-du-Lac, France
- <sup>48</sup> Institute for Future Energy Consumer Needs and Behavior FCN School of Business and Economics/E.ON Energy Research Center, RWTH Aachen University, Aachen, Germany
- <sup>49</sup> Institute for Nanoelectronics, Technische Universität München, Munich, Germany
- <sup>50</sup> Institute for Organic Chemistry, Johannes Gutenberg Universität, Mainz, Germany
- <sup>51</sup> Institute of Air Handling and Refrigeration ILK, Dresden, Germany
- <sup>52</sup> Institute of Energy- and Climatedereseach, Forschungszentrum Jülich, Jülich, Germany
- <sup>53</sup> Instituto de Energía Solar, Universidad Politécnica, Madrid, Spain
- <sup>54</sup> ISFOC, Puertollano, Spain
- <sup>55</sup> Isofotón, Málaga, Spain
- <sup>56</sup> KACO new energy GmbH, Neckersulm, Germany
- <sup>57</sup> Karlsruhe Institute of Technology KIT, Karlsruhe, Germany
- <sup>58</sup> Konkuk University – Fraunhofer Next Generation Solar Cell Research Center KFnSC, Seoul, Republic of Korea
- <sup>59</sup> Kristallographisches Institut, Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg, Germany
- <sup>60</sup> LG Electronics, Seoul, Republic of Korea
- <sup>61</sup> Manz AG, Reutlingen, Germany
- <sup>62</sup> Massachusetts Institute of Technology MIT, Cambridge, MA, USA
- <sup>63</sup> Mechatronic Systemtechnik GmbH, Villach, Austria
- <sup>64</sup> Merck KGaA, Darmstadt, Germany
- <sup>65</sup> MIND-IN<sup>2</sup>UB, Universitat de Barcelona, Barcelona, Spain
- <sup>66</sup> MTU Friedrichshafen GmbH, Friedrichshafen, Germany
- <sup>67</sup> Narec Solar Ltd., Blyth, United Kingdom
- <sup>68</sup> National Agency for New Technologies Energy and Sustainable Economic Development ENEA, Portici, Italy
- <sup>69</sup> National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST, Ibaraki, Japan
- <sup>70</sup> National Water Research Center NWRC, Cairo, Egypt
- <sup>71</sup> Novatec Solar, Karlsruhe, Germany
- <sup>72</sup> ONE, Casablanca, Morocco
- <sup>73</sup> Photovoltech NV, Tienen, Belgium
- <sup>74</sup> PSE AG, Freiburg, Germany
- <sup>75</sup> Q-Cells SE, Bitterfeld-Wolfen, Germany
- <sup>76</sup> RENA GmbH, Freiburg, Germany



## SONSTIGE VERÖFFENTLICHUNGEN

- <sup>77</sup> *Research School of Engineering Australian National University, Canberra, ACT Australia*
- <sup>78</sup> *Sharp Co., Nara, Japan*
- <sup>79</sup> *Slovenian National Building and Civil Engineering Institute ZAG, Ljubljana, Slovenia*
- <sup>80</sup> *Soitec Solar GmbH, Freiburg, Germany*
- <sup>81</sup> *Solar Energy Research Institute of Singapore SERIS, Singapore*
- <sup>82</sup> *SoLayTec, Eindhoven, The Netherlands*
- <sup>83</sup> *Staatliche Forschungsanstalt für Gartenbau Weihenstephan, Weihenstephan-Triesdorf, Germany*
- <sup>84</sup> *Takano Co., Nagano, Japan*
- <sup>85</sup> *Technische Universität Dresden, Dresden, Germany*
- <sup>86</sup> *Tecnalia Research & Innovation, Derio, Spain*
- <sup>87</sup> *Tel Aviv University, Tel Aviv, Israel*
- <sup>88</sup> *The University of Kobe, Kobe, Japan*
- <sup>89</sup> *The University of Miyazaki, Miyazaki, Japan*
- <sup>90</sup> *The University of Tokyo, Tokyo, Japan*
- <sup>91</sup> *Toyota Technological Institute, Nagoya, Japan*
- <sup>92</sup> *TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH Regenerative Energien, Cologne, Germany*
- <sup>93</sup> *Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, Spain*
- <sup>94</sup> *Università di Modena e Reggio Emilia, Reggio Emilia, Italy*
- <sup>95</sup> *Universität Konstanz, Constance, Germany*
- <sup>96</sup> *University of Cracow, Cracow, Poland*
- <sup>97</sup> *Utrecht University, Utrecht, The Netherlands*
- <sup>98</sup> *Voltec Solar, Dinsheim, France*
- <sup>99</sup> *Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg ZSW, Ulm, Germany*