



Fraunhofer

ISE

FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE



Jahresbericht

2014/15

Titelfoto:

Einseitige Inline-Kupferabscheidung auf Siliciumsolarzellen mit licht-induzierter Galvanik: Elektrochemische Prozesse zur Kontaktierung von Solarzellen werden am Fraunhofer ISE bereits seit mehreren Jahren verfolgt. Sie sind schnell, kostengünstig und laufen bei niedrigen Temperaturen ab. Bereits relativ etablierte Verfahren wie der galvanische Vollaufbau von Solarzellenkontakten aus Nickel, Kupfer und Zinn stehen unmittelbar vor der Marktreife. In der gezeigten industrienahen Anlage zur Kupferabscheidung werden diese Verfahren durch das Fraunhofer ISE gemeinsam mit seinen Industriepartnern für erste Kunden bemustert. Daneben erforscht das Fraunhofer ISE auch innovative Verfahren wie das elektrochemische Strukturieren von Aluminium (Seite 32). Unsere Expertise bezüglich der elektrochemischen Gegebenheiten in Kombination mit Prozesstechniken führte hier zur Idee eines vollständig neuen Strukturierungsansatzes, der für diverse fortschrittliche Zellkonzepte die Möglichkeit zur Metallstrukturierung bei niedriger Temperatur mit nur einem einfachen Prozessschritt bietet. (Foto: Achim Käflein)

VORWORT



Im vergangenen Jahr konnten wir am Fraunhofer ISE die Früchte unserer FuE-Arbeiten in Form von gleich mehreren großen Ehrungen und Auszeichnungen ernten. So begann das Jahr 2014 damit, dass Scheich Mohammed Bin Zayed Al Nahyan, Kronprinz von Abu Dhabi mir auf dem World Future Energy Summit in Abu Dhabi für das Fraunhofer ISE den Zayed Future Energy Prize überreichte. Die mit 1,5 Millionen US-Dollar dotierte Auszeichnung wurde dem Institut in der Kategorie Nongovernmental Organization (NGO) für seinen Einfluss auf den spürbaren industriellen, gesellschaftlichen und ökologischen Wandel, seine Führungsrolle und Vorbildfunktion sowie nicht zuletzt seine Zukunftsfähigkeit und sein Innovationspotenzial verliehen. Das Preisgeld haben wir in ein Förderprogramm eingebracht, das vom Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft um die gleiche Summe ergänzt wurde. Das Geld wird nun für den Anstich von Projekten auf dem Gebiet der nachhaltigen Energieversorgung im Ausland eingesetzt (Seite 13).

Eine hohe Auszeichnung wurde auch Dr. Stefan Glunz, Bereichsleiter »Solarzellen – Entwicklung und Charakterisierung« am Fraunhofer ISE und einem der weltweit führenden Wissenschaftler auf dem Gebiet der hocheffizienten Photovoltaik der nächsten und übernächsten Generation, zuteil. Die EU-Kommission verlieh ihm im September den Becquerel-Preis und würdigte damit die herausragende Pionierarbeit für hocheffiziente Siliciumsolarzellen unseres langjährigen Kollegen. Dabei wurde besonders die große Bandbreite seiner Ansätze zur Wirkungsgradsteigerung und damit der Kostensenkung für die Solarstromgewinnung hervorgehoben. Diese reichen von der Untersuchung elektrisch aktiver Defekte in den Zellen selbst über die Senkung des Materialbedarfs bis hin zu zahlreichen Innovationen in der Produktionstechnologie.

Zu den weiteren Ehrungen und Preisen, mit denen die FuE-Arbeit am Fraunhofer ISE (Seite 12) im Jahr 2014 ausgezeichnet wurde, zählt auch der Laser Technology Award. Dr. Ralf Preu, Bereichsleiter »Photovoltaik-Produktions-

technologie und Qualitätssicherung«, Dr. Jan Nekarda und Martin Graf nahmen im Mai den »Innovation Award Laser Technology 2014« für ihre Arbeiten an Laser-Fired Contacts (LFC) für hocheffiziente Solarzellen entgegen. Der Preis wird alle zwei Jahre vom Arbeitskreis Lasertechnik e. V. und dem European Laser Institute ELI als europäischer Wissenschaftspreis vergeben.

Die herausragende Arbeit der Wissenschaftler unseres Instituts zeigt sich auch an gleich drei neuen Professuren, die wir im Jahr 2014 verzeichnen konnten. Im Januar wurde der Stellvertretende Institutsleiter und Leiter des Bereichs »Energieeffiziente Gebäude«, Prof. Dr. Hans-Martin Henning, mit einer W3-Professur auf den Lehrstuhl »Technische Energiesysteme« an der Fakultät für Maschinenbau am KIT in Karlsruhe berufen. Prof. Dr.-Ing. Christof Wittwer wurde zum Honorar-Professor an der Fakultät für »Umwelt und natürliche Ressourcen« der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg ernannt und Dr. Stefan Glunz erhielt einen Ruf auf die W3-Professur »Photovoltaische Energiekonversion« an der Technischen Fakultät der Universität Freiburg.

Feiern konnten wir im Jahr 2014 auch gleich zwei neue Weltrekorde in der Konzentrator-Photovoltaik. Mit unserer am Fraunhofer ISE entwickelten Modultechnologie FLATCON® erzielten wir einen Wirkungsgrad von 36,7 %. Erreicht wurde dies durch die Anpassung der Linsen an eine neue Solarzellenstruktur. Mit Soitec und CEA-Leti haben wir zudem die dafür erforderlichen Mehrfachsolarzellen weiterentwickelt und den neuen Weltrekord von 46 % für die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom erreicht.

Aller wissenschaftlichen Exzellenz zum Trotz war das Jahr 2014 für das Fraunhofer ISE wie auch für die gesamte Solarbranche in Deutschland wirtschaftlich schwierig. Aufgrund der großen Überkapazitäten, die in den letzten Jahren weltweit im PV-Bereich aufgebaut wurden, gingen in den letzten Jahren die Bestellungen für neue PV-Produktionsanlagen dramatisch

zurück und viele Hersteller müssen um ihr Überleben kämpfen. Die Preise der PV-Module fielen auf unter 50 ct/Watt. Gleichzeitig führten diese niedrigen Preise zu so geringen Kosten von PV-Strom – weit unter 10 \$ct/kWh in sonnenreichen Ländern – dass die Photovoltaik weiter boomt. Im Jahr 2014 erwarten wir weltweit einen Zubau von mehr als 46 GW. Allerdings wird Deutschland wohl bei den Neuinstallationen auf den 5. Platz rutschen, nach China, USA, Japan und Großbritannien.

In Deutschland haben die letzten Entscheidungen zum Thema EEG keinen Rückenwind für die PV-Industrie und die Energiewende gebracht. Selbst erzeugter PV-Strom von Anlagen mit mehr als 10 kW wurde nun sogar mit einer Abgabe belegt, was das Umfeld für Investoren nicht verbessert hat. In Deutschland werden 2014 wohl nur noch weniger als 2000 MW zugebaut werden, noch weniger als der allgemein als sehr niedrig angesehene »Zubaukorridor«. Viele Branchenanalysten gehen davon aus, dass die sich durch Insolvenzen und Zusammenlegungen verringernde globale Produktionskapazität rasch in der Nähe des für 2016–17 zu erwartenden weltweiten Marktvolumens stabilisieren wird. Planungen für neue Kapazitäten führen bereits jetzt zu ersten merklichen Anzeichen der Wende auch für die PV-Ausrüster. So schauen wir wieder optimistischer auf die Zukunft der Solarbranche.

Um das Fraunhofer ISE optimal auf die Anforderungen der Energiewende und der Industrie auszurichten, hatten wir das Institut im Jahr 2013 in zwölf neue Geschäftsfelder und elf Kompetenzfelder gegliedert – dieser Struktur entspricht auch dieser Jahresbericht. Im vergangenen Jahr haben wir die Strategien, die diese Geschäftsfelder verfolgen, mit Auditoren aus der Industrie eingehend diskutiert, um das Institut künftig noch effizienter und leistungsstärker aufzustellen. Insgesamt können wir die augenblickliche Lage des Fraunhofer ISE als Konsolidierungsphase beschreiben, was vielen Institutsstruk-

turen nach den Jahren des stürmischen Wachstums 2006 bis 2013 auch gut tut. So sind wir für die weitere Branchenentwicklung gut gerüstet.

Das Fraunhofer ISE engagiert sich auch weiterhin für das Projekt »xGWp«. Dabei arbeiten wir im Rahmen eines deutsch-französisch-schweizerischen Konsortiums mit den Instituten CEA / INES und CSEM zusammen, um eine global wettbewerbsfähige Produktionsstätte in Europa für neueste PV-Technologie zu etablieren. Ziel ist, mit einer neuen Zell- und Produktionstechnologie die europäische PV-Industrie zu einem Zeitpunkt wieder konkurrenzfähig zu machen, zu dem die weltweite Nachfrage wieder an Dynamik gewinnt. Eine weitere Aktivität in diesem Sinne ist das Projekt »Vallis Solaris«, das den Aufbau einer vollständigen, vertikalen PV-Produktionskette und damit die Etablierung lokaler Aktivitäten in sonnigen Ländern Europas ohne die Notwendigkeit eines Einspeisetarifs zum Ziel hat.

Unsere internationalen Aktivitäten haben wir auch in anderer Hinsicht verstärkt. Im Rahmen des dritten deutsch-chilenischen Bergbau- und Rohstoffforums in Berlin konnte ich im Beisein der chilenischen Staatspräsidentin Michelle Bachelet und des Fraunhofer-Präsidenten Prof. Dr.-Ing. Reimund Neugebauer eine Vereinbarung über die Errichtung eines zweiten Fraunhofer Centers in Chile unterzeichnen. Das »Center for Solar Energy Technologies (CSET)« wird sich mit Solarstrom, solarer Wärme und Wasseraufbereitung befassen. Das CSET wird unter dem Dach der Stiftung »Fraunhofer Chile Research« in Betrieb genommen.

Mit Fumio Murata, Gouverneur der Präfektur Fukushima, haben wir ein Memorandum of Understanding unterzeichnet, das Fukushima dabei unterstützen soll, ein Forschungszentrum für erneuerbare Energien zu etablieren. Mit dem King Abdulla City for Atomic and Renewable Energy, K.A. Care in Riad,

Saudi Arabien, haben wir ein Zusammenarbeitsabkommen geschlossen, das Forschungs-, Test-, und Trainingsaktivitäten umfasst.

Das Fraunhofer ISE ist durch seine Kooperationen und Memorandums of Understanding – aber auch durch die an unserem Institut tätigen Gastwissenschaftler – vielfach international vernetzt (Seite 150/151). Dies wollen wir in den nächsten Jahren noch weiter verstärken. Dazu trägt auch meine Wahl zum Präsidenten der Association of European Renewable Energy Research Centers, EUREC, bei. In dieser Position will ich ab Januar 2015 unter anderem daran arbeiten, die nationalen Interessenverbände in Europa besser einzubinden und die EUREC so zu einem gewichtigen Gesprächspartner der EU-Kommission und des EU-Parlaments zu machen.

In der Richtigstellung der zum Teil stark verzerrten Fakten, mit denen in der energiepolitischen Diskussion operiert wird, sieht das Fraunhofer ISE eine wichtige Aufgabe. Bereits seit mehreren Jahren stellen wir Energiedaten für Deutschland aus verschiedenen Quellen zusammen und analysieren diese wissenschaftlich. Seit dem Jahr 2014 stellen wir die kompletten Daten auch zeitnah und kostenlos im Internet zur Verfügung. Daten zur Stromerzeugung aus allen konventionellen und erneuerbaren Quellen, Import und Export stehen nun in individuell gestaltbaren Grafiken unter www.energy-charts.de bereit. Die außerordentlich hohen Zugriffsraten aus aller Welt zeigen uns, dass wir mit diesem Werkzeug einen wertvollen Beitrag zur Datentransparenz leisten (Seite 131).

Eine neue Veranstaltungsreihe haben wir gemeinsam mit den vier anderen hier angesiedelten Fraunhofer-Instituten und der Albert-Ludwigs-Universität im Oktober in Freiburg etabliert. Der »Sustainability Summit« ist aus dem seit 2008 jährlich in Freiburg durchgeführten »Solar Summit« hervorgegangen. In dem neuen Veranstaltungsformat wurde das Themenspektrum

deutlich erweitert. Dies hebt die internationale Vorreiterrolle Freiburgs in Sachen Nachhaltigkeitsforschung hervor. Die Veranstaltung befasst sich mit der Transformation zu einer nachhaltigen Lebensweise nicht nur durch die Bereitstellung technologischer Lösungen, sondern begleitend auch durch gesellschaftliche Akzeptanz und die richtigen rechtlichen wie ökonomischen Randbedingungen. In den kommenden Jahren soll diese Konferenz zu einem Aushängeschild für die exzellente Forschung werden, die in Freiburg im weiten Feld der nachhaltigen Entwicklung betrieben wird.

Wir freuen uns auch in anderer Hinsicht über die gute Zusammenarbeit zwischen der Universität und den Fraunhofer-Instituten in Freiburg. Sie findet unter anderem ihren Ausdruck in der bevorstehenden Gründung eines eigenen, dritten Instituts in der Technischen Fakultät »Institute for Sustainable Systems Engineering ISSE«.

Und schließlich brachte das Jahr 2014 auch für mich persönlich eine besondere Ehrung. Zu meinem 65. Geburtstag im Oktober wurde ich mit der Fraunhofer-Medaille geehrt, wofür ich mich herzlichst bedanke. Ich habe mich bereit erklärt, dem Fraunhofer ISE noch für einige Zeit als Institutsleiter zur Verfügung zu stehen und in dieser Funktion mein Engagement für eine CO₂-freie globale Energieversorgung fortzusetzen.

Bei unseren Kuratoren, Auditoren und Stipendiengebern, unseren Ansprechpartnern in den Ministerien auf Bundes- und Länderebene sowie bei den Projektträgern – ganz besonders unseren Industriepartnern – möchte ich mich für die Unterstützung und Förderung unseres Instituts und die vertrauensvolle Zusammenarbeit auch in diesem Jahr ganz herzlich bedanken.



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

INHALTSVERZEICHNIS

- 8** Organisationsstruktur, Geschäftsfelder
- 10** Das Institut im Profil
- 12** Preise und Auszeichnungen
- 13** Das »Fraunhofer-Zayed-Programm«
- 14** Fraunhofer ISE Alumni
- 15** Kuratorium

- 16** **SILICIUM-PHOTOVOLTAIK**
 - 19** High Efficiency Multikristalline Siliciumwafer für die Photovoltaik
 - 20** Kostensenkung durch Mehrfach-Ziehen bei Monokristallherstellung
 - 21** Abtragsprozessoptimierung durch neuen Kratzversuchsstand
 - 22** Siliciumfolien für die Anwendung in der Photovoltaik
 - 23** Potenzialanalyse von multikristallinem n-Typ Silicium
 - 24** Mikrorisse in Wafern und Zellen: Detektion und Klassifizierung
 - 25** Inline-fähige Dickenbestimmung dielektrischer Schichtstapel
 - 26** Effektive Entspiegelungstextur für multikristalline Oberflächen
 - 27** POCl_3 -basierte Co-Diffusionsprozesse für n-Typ Si-Solarzellen
 - 28** Charakterisierung von Aluminiumoxid-Passivierschichten
 - 29** Cappinglayer für Passivierungsschichten durch Sprühpyrolyse
 - 30** Tunneloxide für hocheffiziente passivierte Kontakte (TOPCon)
 - 32** Elektrochemische Strukturierungsprozesse für Solarzellen
 - 33** Feinlinienmetallisierung mit neuem Multinozzle-Dispenser
 - 34** Nanoimprint-Lithographie für höchstaufgelöste Solarzellenstrukturen
 - 35** Hocheffizienz-Industriesolarzellen mit Folienmetallisierung
 - 36** Photolumineszenzbasierte Charakterisierung von Rückseitenkontaktzellen
 - 37** Wirkungsgrade über 30 % mit Silicium-basierten Tandemsolarzellen

**38 III-V- UND KONZENTRATOR-
PHOTOVOLTAIK**

- 41 FLATCON® Modul erzielt 36,7 % Wirkungsgrad mit Vierfachsolarzellen
- 42 Hocheffiziente, gebondete Vierfachsolarzellen auf Germanium
- 43 Ultra-dünne Zellen auf Metallfolie mit recycelbaren Substraten
- 44 CPV-Modul-Technologie auf Basis der Cassegrain-Optik
- 45 Charakterisierung von Parabolspiegeln für Konzentrator-PV
- 46 All-Purpose MWT-Konzept für größenvariable Solarzellen
- 47 Monochromatische Charakterisierung von Laserleistungszellen

**48 FARBSTOFF-, ORGANISCHE UND
NEUARTIGE SOLARZELLEN**

- 51 In situ Herstellung von Perowskit-Solarmodulen
- 52 Lebensdaueruntersuchungen an organischen Solarzellen
- 53 Photonenmanagement für effiziente und kostengünstige Solarzellen

**54 PHOTOVOLTAISCHE MODULE
UND KRAFTWERKE**

- 57 Drahtverschaltung von Solarzellen – effizient und zuverlässig
- 58 Modulintegration von Solarzellen: Gewinne und Verluste
- 59 Photovoltaic Module Durability Initiative (PVDI)
- 60 Mapping und Klassifizierung der PV-Materialbelastung
- 61 Erfassung von Soiling-Effekten und Prüfung von Beschichtungen

- 62 Ladungstransport in Solarmodulen bei Hochspannungsbelastung
- 63 Qualitätsbenchmarking von PV-Modulen
- 64 Qualitätsstandards für die Bankability von PV-Kraftwerken
- 65 Repowering von PV-Kraftwerken
- 66 Simulation der Betriebstemperatur von BIPV-Systemen
- 67 Die Rolle von PV-Kraftwerken im europäischen Energiesystem

68 SOLARTHERMIE

- 71 Von anderen Branchen lernen: vom Heizkörper zum Solarabsorber
- 72 Zertifizierung von PVT-Kollektoren
- 73 Wärmeverluste von Receivern in linearen Fresnel-Kollektoren
- 74 Solare Prozesswärme für industrielle Dampfnetze in Tunesien
- 75 Wasseraufbereitung mit solar betriebenen Membranverfahren
- 76 Optimierung der Betriebsführung von solarthermischen Kraftwerken
- 77 Korrosion als Belastungsfaktor für Materialien und Kollektoren

78 ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE

- 81 Vorfertigung mehrfach funktionaler Fassaden
- 82 Vakuumisolationsglas: Fenster mit sehr niedrigem U-Wert
- 83 Outdoor-Vermessung aktiver Fassadenelemente in Originalgröße
- 84 Sorptionsmaterialien und Beschichtungen für Adsorptionsprozesse
- 85 Effiziente Wärmeübertragung mit Metallgewebestrukturen
- 86 Messtechnische Untersuchung vielfältiger Wärmepumpenlösungen
- 87 Potenzial genutzt – Elektromobilität im Energieplushaus
- 88 Fehlererkennung und -diagnose im energetischen Gebäudebetrieb
- 89 Integrierte Simulation komplexer Fenstersysteme

90 SPEICHERTECHNOLOGIEN

- 93 Beschleunigtes Formierverfahren für Lithium-Ionen-Zellen
- 94 Ladegradbestimmung von Redox-Flow-Batterien
- 95 Solarbatteriesysteme – Dienstleister für das Stromnetz?
- 96 Hochtemperaturspeicher mit integriertem Dampferzeuger
- 97 Phasenwechselmaterial-Emulsionen zur Wärmespeicherung

98 WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLENTechnologie

- 101 Langzeituntersuchungen an PEM-Druckelektrolyseuren für PtG-Anwendungen
- 102 Schnellalterungstests für PEM-Brennstoffzellen
- 103 Grundbausteine der chemischen Industrie aus Biomasse gewinnen
- 104 Kommunaler Energieverbund – Power-to-Gas in Freiburg Nord
- 105 Expertennetzwerk Brennstoffzellenproduktionstechnologie

106 ENERGIEEFFIZIENTE LEISTUNGSELEKTRONIK

- 109 DC/DC-Wandler zur effizienten Anbindung von Batteriemodulen an Hochvolt-Bus
- 110 Leistungselektronik für PV-Kraftwerke der Zukunft
- 111 Multifunktionswechselrichter zur Eigenverbrauchs-optimierung

112 EMISSIONSFREIE MOBILITÄT

- 115 Innovativ strukturiertes Batteriemanagementsystem
- 116 Elektrofahrzeuge optimal integrieren
- 117 Charakterisierung automobiler Brennstoffzellen

118 SYSTEMINTEGRATION UND NETZE – STROM, WÄRME, GAS

- 121 Sind nachhaltige Energiesysteme für unsere Städte möglich?
- 122 Flexibilisierung von Wärme-, Kälte- und Stromversorgung
- 123 Optimierung der Auslastung von Verteilnetzen durch Smart Meter
- 124 Regionale Betreibermodelle für dezentrale Energieanlagen
- 125 Dieseleinsparpotenzial durch PV-Integration in Dieselnetze

1 2 6 E N E R G I E S Y S T E M A N A L Y S E

- 129** Transformationspfade der deutschen Energieversorgung
- 130** Betreibermodelle für Stromspeicher
- 131** Fraunhofer ISE »Energy Charts«: Neue Website mit interaktiven Energiedaten

1 3 2 S E R V I C E B E R E I C H E

- 136** Kalibrieren von Solarzellen nach internationalen Standards
- 137** Weltweit präziseste Charakterisierung von PV- und CPV-Modulen
- 138** Umfassende Modulprüfungen im TestLab PV Modules
- 139** Prüfen und Mitgestalten im TestLab Solar Thermal Systems
- 140** Vermessung von Fassaden und transparenten Bauteilen
- 141** Vermessung von Leistungselektronik nach internationalen Standards
- 142** ServiceLab PV Power Plants
- 142** ServiceLab Batteries
- 143** ServiceLab Lighting and DC Appliances
- 143** ServiceLab Smart Energy
- 144** ServiceLab Heat Pumps and Chillers
- 144** ServiceLab Phase Change Materials
- 145** ServiceLab Thermochemical and Porous Materials
- 145** ServiceLab Fuel Cells

1 4 6 A N H A N G

- 147** Lehrveranstaltungen
- 148** Professuren und Promotionen
- 150** Internationale Vernetzung
- 152** Impressum



- 1 Die Institutsleitung des Fraunhofer ISE (v. l. n. r.): Prof. Dr. Hans-Martin Henning, Stellvertretender Institutsleiter und Geschäftsfeldkoordinator »Energieeffiziente Gebäude«, Dr. Andreas Bett, Stellvertretender Institutsleiter und Geschäftsfeldkoordinator »III-V- und Konzentrator-Photovoltaik«, Prof. Dr. Eicke R. Weber, Institutsleiter, Dr. Holger Schroeter, kaufmännischer Direktor.
- 2 Dr. Uli Würfel, Geschäftsfeldkoordinator »Farbstoff-, Organische und Neuartige Solarzellen«, Dr. Ralf Preu, Geschäftsfeldkoordinator »Silicium-Photovoltaik«, Dr. Harry Wirth, Geschäftsfeldkoordinator »Photovoltaische Module und Kraftwerke«, Dr. Stefan Glunz, Geschäftsfeldkoordinator »Silicium-Photovoltaik« (v. l. n. r.).

ORGANISATIONSSTRUKTUR

Institutsleitung	Prof. Dr. Eicke R. Weber	+49 761 4588-5121
Stellvertretende Institutsleitung	Dr. Andreas Bett Prof. Dr. Hans-Martin Henning	+49 761 4588-5257 +49 761 4588-5134
Kaufmännischer Direktor	Dr. Holger Schroeter	+ 49 761 4588-5668
Presse und Public Relations	Karin Schneider M.A.	+49 761 4588-5150
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

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).



3 Dr. Thomas Schlegl, Geschäftsfeldkoordinator »Energiesystemanalyse«, Dr. Günther Ebert, Geschäftsfeldkoordinator »Energieeffiziente Leistungselektronik«, Prof. Dr. Christof Wittwer, Geschäftsfeldkoordinator »Systemintegration und Netze – Strom, Wärme, Gas«, Dipl.-Ing. Ulf Groos, Geschäftsfeldkoordinator »Emissionsfreie Mobilität« (v. l. n. r.).

4 Dr. Peter Schossig, Geschäftsfeldkoordinator »Speichertechnologien«, Dr. Werner Platzer, Geschäftsfeldkoordinator »Solarthermie«, Dr. Christopher Hebling, Geschäftsfeldkoordinator »Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie« (v. l. n. r.).

GESCHÄFTSFELDER

Silicium-Photovoltaik	Dr. Stefan Glunz Dr. Ralf Preu	+49 761 4588-5191 +49 761 4588-5260
III-V- und Konzentrator-Photovoltaik	Dr. Andreas Bett	+49 761 4588-5257
Farbstoff-, Organische und Neuartige Solarzellen	Dr. Uli Würfel	+ 49 761 203-4796
Photovoltaische Module und Kraftwerke	Dr. Harry Wirth	+49 761 4588-5858
Solarthermie	Dr. Werner Platzer	+49 761 4588-5983
Energieeffiziente Gebäude	Prof. Dr. Hans-Martin Henning	+49 761 4588-5134
Speichertechnologien	Dr.-Ing. Peter Schossig Dr. Günther Ebert	+49 761 4588-5130 +49 761 4588-5229
Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie	Dr. Christopher Hebling	+49 761 4588-5195
Energieeffiziente Leistungselektronik	Dr. Günther Ebert	+49 761 4588-5229
Emissionsfreie Mobilität	Dipl.-Ing. Ulf Groos	+49 761 4588-5202
Systemintegration und Netze – Strom, Wärme, Gas	Prof. Dr.-Ing. Christof Wittwer	+49 761 4588-5115
Energiesystemanalyse	Dr. Thomas Schlegl	+49 761 4588-5473

DAS INSTITUT IM PROFIL

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

Forschungs- und Dienstleistungsangebot

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

Vernetzung in der Fraunhofer-Gesellschaft

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

Außenstandorte und Kooperationen

Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen LSC

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

Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP

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

Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM

Das Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM in Freiberg, Sachsen, ist eine Kooperation des Fraunhofer ISE mit dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB, Erlangen. Das THM unterstützt Firmen bei der Forschung und Entwicklung zur Materialpräparation und -bearbeitung für 300-mm-Silicium, Solarsilicium und III-V-Halbleiter. Ergänzend bietet es Dienstleistungen in den Bereichen Analytik, Charakterisierung und Tests an.

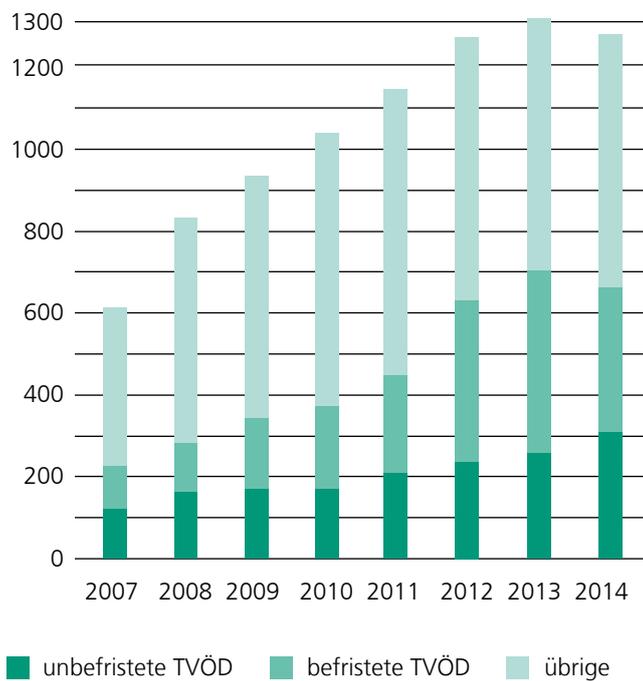
Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE

Das Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE, 2008 in Boston aus der Kooperation des Fraunhofer ISE mit dem Massachusetts Institute of Technology MIT entstanden, trägt dazu bei, in Europa etabliertes Know-how und Technologien im Bereich erneuerbarer Energien für den amerikanischen Markt weiterzuentwickeln und dort einzuführen. In Albuquerque, New Mexico betreibt das Fraunhofer CSE gemeinsam mit der Canadian Standards Association CSA ein Testzentrum für PV-Module, das CFV Solar Test Laboratory.

Fraunhofer Chile Research – Centro para Tecnologías en Energía Solar

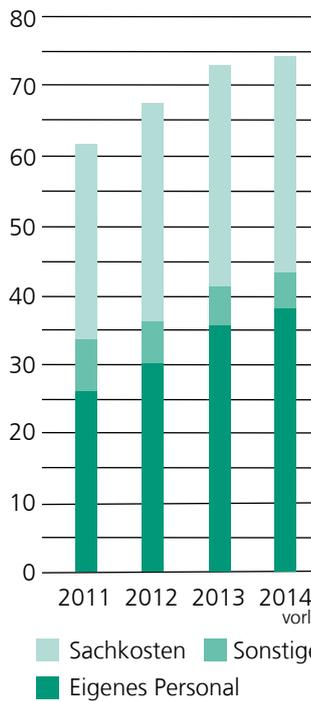
Mit dem Centro para Tecnologías en Energía Solar (Center for Solar Energy Technology) baut die Fraunhofer-Gesellschaft ihr Engagement in Chile weiter aus. Wissenschaftler des Fraunhofer ISE, der Pontificia Universidad Católica de Chile und anderer chilenischer Universitäten werden besonders an der Gewinnung von Strom und Prozesswärme sowie der Aufbereitung von Wasser forschen.

Personal

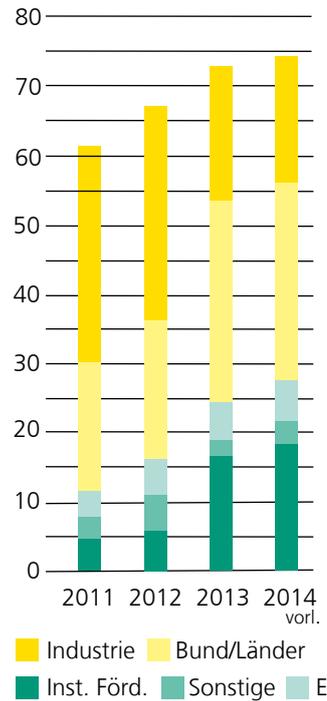


Am 31.12.2014 waren am Fraunhofer ISE insgesamt 1277 Mitarbeiter beschäftigt. Davon unterstützen 146 Promovierende, 123 Diplomanden, 42 Praktikanten, 300 wissenschaftliche Hilfskräfte sowie weitere 117 Mitarbeiter (z. B. Gastwissenschaftler) die Arbeit in den Forschungsprojekten und tragen wesentlich zu den wissenschaftlichen Ergebnissen bei.

Kosten Mio €



Erträge Mio €



Die Finanzstruktur der Fraunhofer-Gesellschaft unterscheidet zwischen dem Betriebs- und dem Investitionshaushalt. Der Betriebshaushalt umfasst alle Personal- und Sachaufwendungen sowie deren Finanzierung durch externe Erträge und institutionelle Förderungen. Unser Betriebshaushalt beträgt 74,3 Millionen Euro. Zusätzlich zu den in der Grafik angegebenen Ausgaben tätigte das Fraunhofer ISE im Jahr 2014 Investitionen in Höhe von 11,8 Millionen Euro (ohne Bauinvestitionen und Konjunkturprogramme).



PREISE UND AUSZEICHNUNGEN

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Zayed Future Energy Prize für Führungsrolle, Vorbildfunktion, Innovationsfähigkeit des größten Europäischen Solarforschungsinstituts, 20.01.2014, Abu Dhabi, VAE

Arne Hendrik Wienhausen und Andreas Hensel
2. Platz Zukunftspreis 2013 der Stiftung Ewald Marquardt für »Entwicklung eines hocheffizienten, kompakten Resonanzwandlers mit Galliumnitrid (GaN)-Transistoren«, 21.02.2014, Rietheim-Weilheim

Christian Schöner, David Derix, Andreas Hensel
1. Posterpreis vom Ostbayerischen Technologie-Transfer-Institut e.V. (OTTI) für »Vergleich von verschiedenen Dreipunkt-Topologien für PV-Wechselrichter zur Eigenverbrauchsoptimierung«, 29. Symposium Photovoltaische Solarenergie, 12.–14.03.2014, Bad Staffelstein

Frank Feldmann, Friedemann Heinz, Florian Schindler, Matthias Breitwieser
SiliconPV Award 2014 für »The 10 Best Ranked Contributions of SiliconPV 2014«, 23.–25.03.2014, s-Hertogenbosch, Niederlande

Dr. Ralf Preu, Dr. Jan Nekarda, Martin Graf
»Innovation Award Laser Technology 2014« des Arbeitskreis Lasertechnik e.V. und European Laser Institute ELI für die Innovation »Laser Fired Contact (LFC) Technologie für die Produktion von hocheffizienten Siliciumsolarzellen«, 07.05.2014, Aachen

Sarah Röttinger
3rd Prize for OPV Posters für Poster »Outdoor Measurements and Stability on Hybrid Inorganic-Organic Photovoltaics«, 14.05.2014, Lausanne, Schweiz

1 Prof. Wim Sinke, Program Development Manager, ECN Solar Energy, Prof. Joachim Luther, Chairman of the Becquerel Prize Committee, Vladimir Sucha, Director-General JRC, European Commission, Dr. Stefan Glunz, Becquerel-Preisträger 2014 (v.l.n.r.).

2 Das Preisträgerteam des Innovation Award Laser Technology 2014: Martin Graf, Dr. Ralf Preu und Dr. Jan Nekarda (v.l.n.r.) mit Siliciumsolarzellen, deren laserkontaktierte Aluminium-Rückseiten mit unterschiedlichen Verfahren hergestellt sind.

Dr. Benjamin Thaidigsmann
KlarText! – Klaus Tschira Preis für verständliche Wissenschaft für »Solarzellen mit Rückspiegel«, 09.09.2014, Heidelberg

Maike Wiesenfarth
Posterpreis bei ESTC 2014 – 5th Electronics System-Integration Technology Conference für »Challenges for Thermal Management and Production Technologies in Concentrating Photovoltaic (CPV) Modules«, 18.09.2014, Helsinki, Finnland

Dr. Stefan Glunz
22. Becquerel-Preis im Rahmen der European PV Solar Energy Conference, EU-Kommission würdigt Pionierarbeit für hocheffiziente Siliciumsolarzellen, 22.09.2014, Amsterdam, Niederlande

Dr.-Ing. Marek Miara
The RENEGY AWARD, RENEXPO Poland, Gewinner in der Kategorie »Outstanding Personality in the Field of Renewable Energy and Energy Efficiency«, 23.09.2014, Warschau, Polen



DAS »FRAUNHOFER-ZAYED-PROGRAMM«

Im Januar 2014 erhielt das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE den Zayed Future Energy Prize, der jährlich für innovative und zukunftsweisende Leistungen auf dem Gebiet der erneuerbaren Energien und der Nachhaltigkeit vergeben wird. Im Rahmen der Sustainability Week in Abu Dhabi nahm Institutsleiter Prof. Eicke Weber die mit 1,5 Millionen US-Dollar dotierte renommierte Auszeichnung für das Institut aus den Händen von Scheich Mohammed Bin Zayed Al Nahyan, Kronprinz von Abu Dhabi, entgegen.

Das Fraunhofer ISE freut sich, dass noch im Jahr der Verleihung die bereits in der Dankesrede formulierte Idee zur Verwendung des Preisgelds umgesetzt werden kann. Der Leitgedanke für einen sinnvollen Einsatz der Mittel war die Möglichkeit, Länder, die noch nicht auf dem Weg einer Energiewende sind, mit Fraunhofer Forschung zu unterstützen. Zum Beispiel in der Form, dass am Fraunhofer ISE konzipierte Energiesystemanalysen und -versorgungsmodelle für einen reibungslosen und kosteneffizienten Wandel hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung für andere Regionen weiterentwickelt werden können und so die Basis für ernsthafte technologische Zusammenarbeit legen.

Projektförderung für nachhaltige Energieversorgung im Ausland

Auf Vorschlag von Prof. Eicke Weber hat der Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft zum Preisgeld in Höhe von 1,5 Mio US-Dollar denselben Betrag (1,089 Mio Euro) für ein Förderprogramm bewilligt, mit dem Fraunhofer-Projekte auf dem Gebiet der nachhaltigen Energieversorgung im Ausland unterstützt werden sollen. Initiativen zu solchen internationalen Projekten scheitern häufig daran, dass keine Mittel zur Anbahnung von Kontakten, für erste Besuche oder den erheblichen administrativen Aufwand bei der

1 *Zayed Future Energy Prize 2014 für das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Institutsleiter Prof. Dr. Eicke R. Weber nimmt den mit 1,5 Millionen US-Dollar dotierten Zayed Future Energy Prize 2014 aus den Händen von Scheich Mohammed Bin Zayed Al Nahyan, Kronprinz von Abu Dhabi, entgegen.*

2 *Kompaktanlage auf Teneriffa, Spanien.*

Antrags- bzw. Angebotserstellung zur Verfügung stehen. Das »Fraunhofer-Zayed-Programm« soll einen finanziellen Beitrag zur Überbrückung solcher Schwierigkeiten leisten.

Vorhaben, die im Rahmen dieses Programms Unterstützung erfahren, dienen der Vorbereitung und Akquisition von internationalen Projekten auf dem Gebiet der Energieversorgung, der Energieumwandlung oder der Energienutzung. Geeignete Folgeprojekte sollen zur Minderung oder Vermeidung schädlicher Emissionen beitragen oder zur Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch Effizienzsteigerung oder Einführung neuer Technologien bzw. Verfahren führen. Zu den Kriterien für die Auswahl der in diesem Rahmen geförderten Projekte zählen u. a. Wissensgewinn, z. B. durch Adaption oder Entwicklung neuer Technologien, ebenso Entwicklung, im Sinne z. B. der Millennium-Entwicklungsziele der Vereinten Nationen sowie Nachhaltigkeit. Letzteres umfasst den Aspekt der Dauerhaftigkeit bei der Lösung drängender Probleme vor Ort, dabei wird Nachhaltigkeit auch im Sinne von Corporate Social Responsibility verstanden. Ein Hauptkriterium der Förderung ist die Wahrscheinlichkeit, dass durch die Anbahnungs-Unterstützung auch tatsächlich ein Projekt mit externer Finanzierung zustande kommt.

FRAUNHOFER ISE ALUMNI



»Fraunhofer ISE ALUMNI – Vernetzt für eine Solare Zukunft« – mit diesem Motto hat das Institut im Sommer 2014 eine Internet-Plattform für ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter etabliert. Auf einer ersten Alumni-Veranstaltung im Rahmen der 29th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition in Amsterdam erfuhr das Portal seinen offiziellen Start. Gemeinsam mit seinen beiden Vorgängern Institutsgründer Prof. Adolf Goetzberger und Prof. Joachim Luther konnte Institutsleiter Prof. Eicke Weber ISE Alumni aus aller Welt, von Schweden, Österreich und Polen bis USA begrüßen. Sowohl das Alumni-Portal als auch die Ehemaligen-Treffen im Kontext von Konferenzen und Messen haben zum Ziel, nicht nur das Networking der ehemaligen mit den aktuellen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern, sondern auch den Austausch zwischen den Alumni, die sich über diese Plattform wiederfinden, zu motivieren und zu verstärken.

Viel Potenzial für eine fruchtbare Vernetzung

Das größte europäische Solarforschungsinstitut hat aktuell 1300 Mitarbeitende und mehr als 30 Jahre Institutsgeschichte, in denen es eine Vielzahl an Fachkräften ausgebildet hat. Allein in den letzten 20 Jahren wurden 220 Promotionen am Fraunhofer ISE verfasst. Zudem sind mehr als ein Dutzend Firmengründungen direkt aus dem Fraunhofer ISE hervorgegangen oder von ehemaligen Mitarbeitenden getätigt worden. Es gibt also viel Potenzial für eine fruchtbare Alumni-Aktivität.

Zahlreiche ehemalige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Fraunhofer ISE zieht es von Freiburg aus in die ganze Welt. Sie sind heute in der Industrie, in Verbänden und Interessenvertretungen, in anderen Forschungseinrichtungen, in der Lehre und im Consulting tätig oder in der Politik aktiv. In ihren neuen Positionen als kompetente Führungskräfte, Opinion Leader und Entscheidungsträger, bestimmen sie zukünftige Strukturen, gestalten Marktentwicklungen, sind verantwortlich für Produktneuheiten und tragen oftmals entscheidend zum Erfolg eines Unternehmens bei. Über die Jahre haben sie sich viel Branchenwissen und Erfahrung erarbeitet. Die meisten bleiben den erneuerbaren Energien treu - ein Thema, das über die Zeit am Fraunhofer ISE hinaus verbindet.

Seit dem Start Ende September 2014 haben sich schon rund 50 ehemalige Kolleginnen und Kollegen im online Alumni Portal registriert. Sie als Leserin und Leser dieses Jahresberichts sind vielleicht selbst Alumni oder kennen ehemalige Mitarbeitende des Fraunhofer ISE. Wir würden uns freuen, Sie als Multiplikatoren für dieses Netzwerk zu gewinnen, im Sinne der uns verbindenden Idee einer nachhaltigen globalen Energieversorgung.

www.alumni.ise.fraunhofer.de

KURATORIUM

VORSITZENDER

Dr. Carsten Voigtländer

Vaillant Group Deutschland GmbH & Co. KG, Remscheid

STELLVERTRETENDER VORSITZENDER

Dr. Hubert Aulich

SC Sustainable Concepts GmbH

MITGLIEDER

Dr. Nikolaus Benz

Schott Solar CSP GmbH, Mainz

Dr. Georg Menzen

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi),
Bonn

Dr. Klaus Bonhoff

NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff-
und Brennstoffzellentechnologie, Berlin

Dr. Dirk-Holger Neuhaus

SolarWorld Innovations GmbH, Freiberg

Hans-Josef Fell

Präsident Energy Watch Group (EWG), Berlin

Dr.-Ing. Norbert Pralle

Züblin AG, Stuttgart

Ministerialrat Stefan Gloger

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

Dr. Klaus-Dieter Rasch

AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn

Dipl.-Ing. Jürgen Gutekunst

RENA GmbH, Gütenbach

Oberregierungsrat Dr. Christoph Rövekamp

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Berlin

Dr. Winfried Hoffmann

Berater Applied Solar Expertise

Prof. Dr. Frithjof Staiß

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

Dipl.-Ing. Helmut Jäger

Solvis GmbH & Co. KG, Braunschweig

Dr. Norbert Verweyen

RWE Effizienz GmbH, Dortmund

Dipl.-Ing./Dipl.-Kauf. Wilfried Jäger

VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut GmbH, Offenbach

Prof. Andreas Wagner

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus

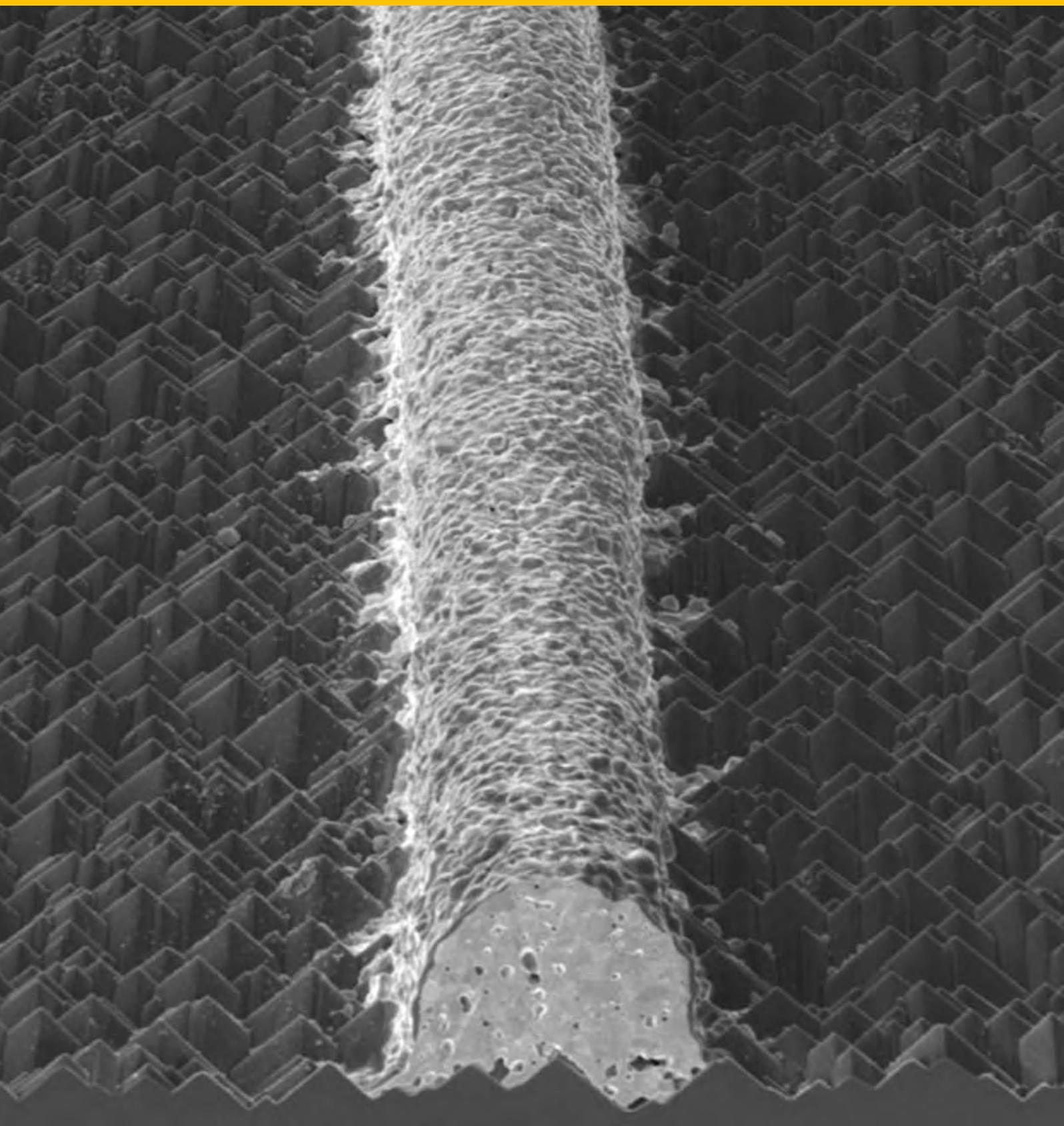
Ministerium für Finanzen und Wirtschaft,
Baden-Württemberg, Stuttgart

Das Kuratorium begutachtet die Forschungsprojekte
und berät die Institutsleitung und den Vorstand der
Fraunhofer-Gesellschaft bezüglich des Arbeitsprogramms
des Fraunhofer ISE (Stand: 31. Dezember 2014).

Dr. Claudia Loy

Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt

SILICIUM-PHOTOVOLTAIK



Ca. 90 % der weltweit hergestellten Solarzellen basieren auf kristallinem Silicium. Wirkungsgrad, Preis- / Leistungsverhältnis, Langzeitstabilität und Kostenreduktionspotenziale sprechen dafür, dass dieser Leistungsträger der terrestrischen Photovoltaik auch künftig marktbeherrschend bleiben wird. Unsere FuE-Angebote zielen darauf ab, gemeinsam mit der Industrie neue, innovative Produkte zur Marktreife zu führen. Ziel ist, die Herstellungskosten zu senken und so die Wettbewerbsfähigkeit der PV-Industrie in Deutschland und Europa zu stärken. Wir bilden dazu die gesamte Wertschöpfungskette der kristallinen Silicium-Photovoltaik ab.

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

Eine zentrale Aufgabe unseres ETALab® (ETA = Effizienz, Technologie, Analyse) ist die Entwicklung und Analyse von hoch-effizienten Zellkonzepten und -prozessen. Mit kosteneffektiven Technologien wollen wir höhere Wirkungsgrade erzielen, um so die Voraussetzung für deutliche Kostensenkungen zu schaffen. Das ETALab® umfasst in einem 500 m² großen Reinraumlabor eine ausgezeichnete Prozessinfrastruktur mit bekannten Technologien wie Bor- und Phosphordiffusion und Nasschemie, aber auch neuen Alternativen wie Ionenimplantation. Damit konnten wir mehrere internationale Rekordwirkungsgrade erzielen und neue wegweisende Prozesse wie z. B. passivierte Kontakte entwickeln. Zudem stehen uns ca. 900 m² Einzellaborflächen zur Verfügung, um effektive Oberflächenpassivierungsschichten, neuartige Metallisierungs- und Dotierverfahren, innovative Nanostrukturierungstechnologien und neue Charakterisierungsmethoden zu entwickeln.

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

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

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

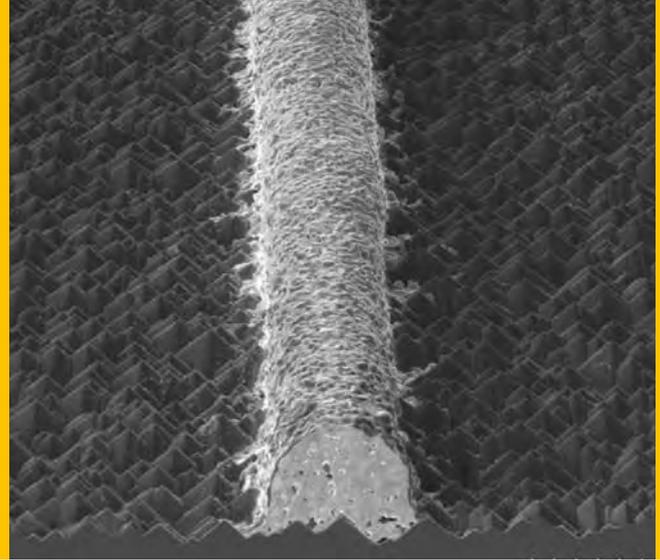
Unsere Aktivitäten im Bereich Siliciummaterial und -solarzellen werden ergänzt durch das Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen LSC.

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	350
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	253
Zeitschriften- und Buchbeiträge	86
Vorträge und Konferenzbeiträge	117
Neu erteilte Patente	12

www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/15



Dispensierter Vorderseitenkontakt auf einer Cz-Si Solarzelle.

ANSPRECHPARTNER

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



HIGH EFFICIENCY MULTIKRISTALLINE SILICIUMWAFER FÜR DIE PHOTOVOLTAIK

Die Qualität von multikristallinem Blocksilicium für die PV kann durch die Vorgabe einer feinkörnigen Kristallstruktur zu Beginn des Wachstumsprozesses positiv beeinflusst werden. Für unsere Untersuchungen zur Herstellung von »High Efficiency Multicrystalline Silicon (HE mc-Si)« studieren wir am Silicium Material Technologie und Evaluationscenter SIMTEC die Entwicklung von Kristallstruktur und Defekten, besonders von Versetzungsclustern, von der initialen Keimbildung bis zur gesamten Blockhöhe. Durch gezielte Einstellung der Form der Phasengrenze während des Wachstumsprozesses in Kombination mit ausgesuchtem Keimmateriale konnte versetzungsarmes multikristallines Silicium mit sehr guten elektrischen Eigenschaften hergestellt werden.

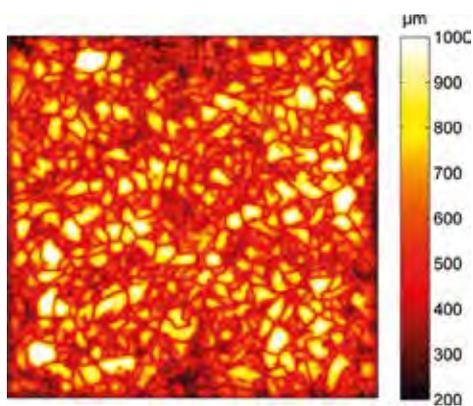
Fridolin Haas, Philipp Häuber, Patricia Krenckel, **Stephan Riepe**, Claudia Schmid, Andreas Bett

Das meiste kristalline Wafermaterial für Solarzellen besteht aktuell aus multikristallinem p-Typ Silicium. Durch Entwicklung von hochqualitativem Blockmaterial mit sehr geringem Versetzungsanteil (HE mc-Si) konnten signifikante Wirkungsgradsteigerungen in den daraus gefertigten Solarzellen erzielt werden. Die Reduktion der Versetzungen im Siliciumblock lässt sich durch einen Wachstumsprozess erreichen, bei dem die Erstarrung in einem stabilen Prozess und unter Vermeidung von Verspannungen im gerade erstarrten Kristall erfolgt. Als vorteilhaft hat sich hier eine gleichmäßige Kornstruktur herausgestellt, die mit sehr kleinen Körnern beginnt. Während der Kristallisation werden kleinere Körner mit teilweise hoher Versetzungsdichte von Körnern mit niedriger Versetzungsdichte überwachsen.

Durch das Studium verschiedener Bedingungen in der Ankeimphase mit und ohne Vorgabe von Keimmateriale sowie durch

1 Querschnitt eines HE mc-Si Blocks im Bodenbereich mit feinkörniger Kristallstruktur.

2 Wafer eines HE mc-Si Blocks aus dem Kappenbereich nach Antireflexbeschichtung.



3 Diffusionslängenbild eines n-Typ HE mc-Si Wafers nach Bor-Diffusion.

die Optimierung des Kristallisationsofens ist es uns gelungen, sowohl p-Typ als auch n-Typ multikristallines Silicium der Blockgröße G1 mit sehr geringer Versetzungsdichte herzustellen. Die durch Versetzungscluster qualitativ beeinträchtigte Fläche der Wafer mit Kantenlänge 156 mm beträgt über die gesamte Blockhöhe weniger als 2 %.

Abb. 3 zeigt das Diffusionslängenbild eines n-Typ HE mc-Si Wafers nach einer für n-Typ Solarzellen typischen Bor-Diffusion. Der gemittelte Wert der Diffusionslänge entspricht 531 µm, etliche Körner weisen Diffusionslängen >950 µm auf. Dies ist ein Vielfaches der Dicke einer Siliciumsolarzelle, so dass die Materialqualität nicht mehr der begrenzende Faktor für den Wirkungsgrad ist.

Die Arbeiten werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Projekt »THESSO« unterstützt.



KOSTENSENKUNG DURCH MEHRFACH-ZIEHEN BEI MONOKRISTALLHERSTELLUNG

Derzeit werden Monowafer für die PV-Industrie ausschließlich nach dem Czochralski-Verfahren hergestellt. In der Cost-of-Ownership-Kalkulation beträgt der Anteil der Verbrauchsmittel annähernd 70 %. Besonders Tiegelkosten (28 %), Graphitbauteile (23 %) und Strom (10 %) schlagen zu Buche. Wenn die Tiegelkosten durch Mehrfachverwendung reduziert werden können, ergibt sich ein Einsparpotenzial von mehr als 25 % gegenüber dem aktuellen, einfachen Batch-Betrieb. Wir haben das Nachführen von festem Polysilicium in die Schmelze erfolgreich unter Verwendung von Granulat und kleinteiligem Siliciumbruch getestet. Mit dem am Fraunhofer CSP optimierten Prozess wurden bis zu vier Kristalle aus einem Tiegel gezogen.

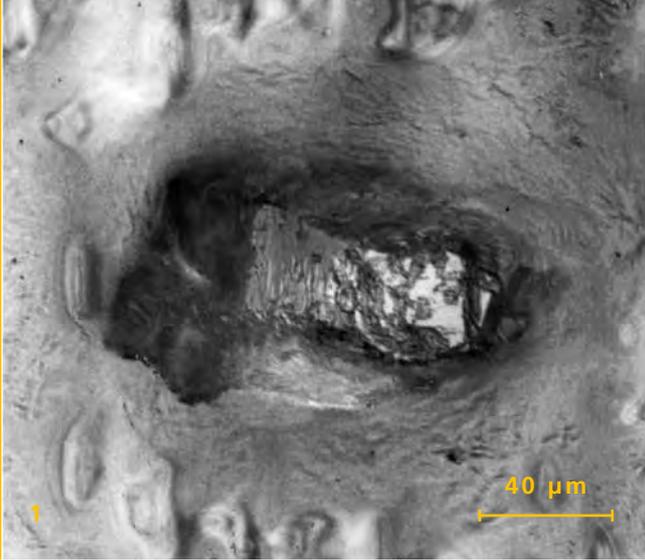
Axel Aderhold, Rainer Barth, **Peter Dold**, Malte Ernst, Roland Kunert, Stefan Wiczorek, Frank Zobel, Andreas Bett

Beim Czochralski-Prozess wird Silicium bei ungefähr 1450 °C in einem Quarzglasiegel aufgeschmolzen und der Siliciumkristall nach oben aus der Schmelze gezogen. Anschließend werden Tiegel und Restschmelze abgekühlt. Beim Abkühlen verbackt zum einen die erstarrte Restschmelze mit dem Tiegel und zusätzlich durchläuft Quarz einen Phasenübergang. Die Folge ist, dass der Tiegel reißt und entsorgt werden muss. Tiegel stellen mit 4 bis 8 € pro kg kristallisiertes Silicium einen erheblichen Kostenfaktor bei der Kristallisation dar. Eine Optimierungsmöglichkeit besteht darin, zusätzliches Silicium in den heißen Tiegel nachzuführen, entweder um den Füllgrad zu Prozessbeginn zu verbessern oder um nach dem Ziehvorgang neues Material in die Restschmelze einzufüllen (Abb. 1) und so einen oder mehrere weitere Kristalle aus dem gleichen Tiegel zu ziehen (Multipulling).

1 Nachchargier (Feeding)-Prozess, Wiederauffüllen des Tiegels mit Polysilicium. Im vorliegenden Fall wurde Granulat in die Restschmelze nachgeführt (links) und anschließend ein weiterer 8" Kristall gezogen (rechte Seite).

Wir haben eine derartige Nachchargiervorrichtung an unserer Anlage installiert. Damit sind wir in der Lage, Multipulling anzuwenden und dessen Vorteile und die potenziellen Schwachpunkte zu analysieren. So weist z. B. granulares Silicium aus dem Wirbelbett-Reaktor die besten Rieseigenschaften auf, allerdings können eingeschlossene Prozessgase zu einem unkontrollierten Wegspritzen von Siliciumtröpfchen führen. Dieses Problem entfällt bei der Verwendung von kleingebrochenem Polysilicium aus dem Siemens-Reaktor. Allerdings besteht ein erhöhtes Risiko, dass die Nachchargiervorrichtung aufgrund der unregelmäßigen Geometrie der Siliciumbruchstücke blockiert wird. Durch entsprechende Modifikationen der Füllrohre und des Transportmechanismus haben wir dieses Problem weitgehend gelöst.

Durch diese und weitere Prozessverbesserungen ist das Fraunhofer CSP nun in der Lage, das Mehrfach-Ziehen von Siliciumkristallen erfolgreich einzusetzen und für Forschungs Kooperationen anzubieten. Wir arbeiten zudem an der weiteren Optimierung des Nachführprozesses und der Korrosionsbeständigkeit des Tiegels.



ABTRAGSPROZESSOPTIMIERUNG DURCH NEUEN KRATZVERSUCHSSTAND

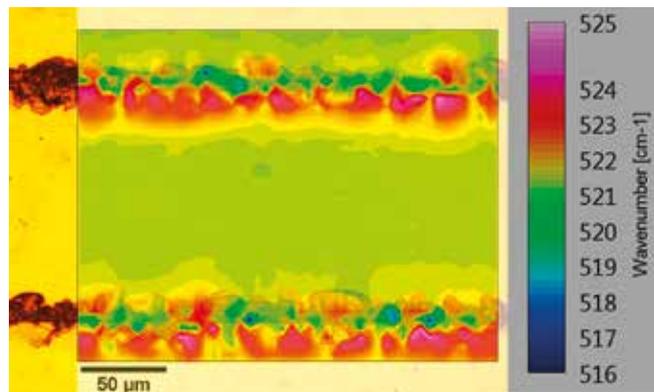
Für die mechanische Bearbeitung von harten Materialien werden spezielle Werkzeuge genutzt, die hohen Anforderungen gerecht werden müssen. Dazu gehören lange Standzeiten mit hohen Abtragsraten und einer Premiumwerkstück-Oberflächenqualität. Die Erforschung und Optimierung des Abtragsprozesses sowie der Werkzeugeigenschaften ist dabei wichtig. Mit einem am Fraunhofer THM entwickelten Versuchsstand ist es möglich, den Abtragsprozess sowie die Eigenschaften von Abrasivmaterialien, Einbettungen sowie Hilfs- und Betriebsstoffen kosteneffizient, schnell, präzise und unter industrierelevanten Prozessbedingungen zu erforschen. Die Optimierung des Diamantdrahts zur Herstellung von PV-Solarwafern ist eines der Einsatzgebiete.

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

In Bezug auf die Entwicklung von Diamantdraht für die PV-Siliziumwaferherstellung ist das Besondere an diesem Versuchsstand die hohe Abrasivpartikelgeschwindigkeit. Dadurch kann der industrielle Abtragsprozess im Labor abgebildet werden. Ein einzelnes oder eine Schicht von Abrasivkörnern wird auf eine Schleifscheibe aufgebracht und bis auf 20 m/s beschleunigt. Durch kontinuierliches Verfahren des Probenmaterials haben wir einzelne Kratzer erzeugt, die in Abhängigkeit der verwendeten Kratzparameter im Labor durch REM- und Raman-Messungen ausgewertet werden. So ist eine hochaufgelöste Analyse der Spannungszustände und Phasenumwandlungen im Siliziummaterial möglich. Im Zentrum des Kratzers konnten wir Zugverspannungen und eine Umwandlung des Siliziums zu einer mikrokristallinen Phase detektieren (blaue Bereiche in Abb. 3). Randbereiche, die nicht abgetragen wurden, wiesen eine starke Druckverspannung auf, die im Ramanmap magentafarben zu erkennen sind. Durch Auswertung des Materialabtrags auf der Probe

1 Optische Mikroskopaufnahme des einzeln auf der Schleifscheibe eingebetteten Diamantkorns mit einem mittleren Durchmesser von 40 µm.

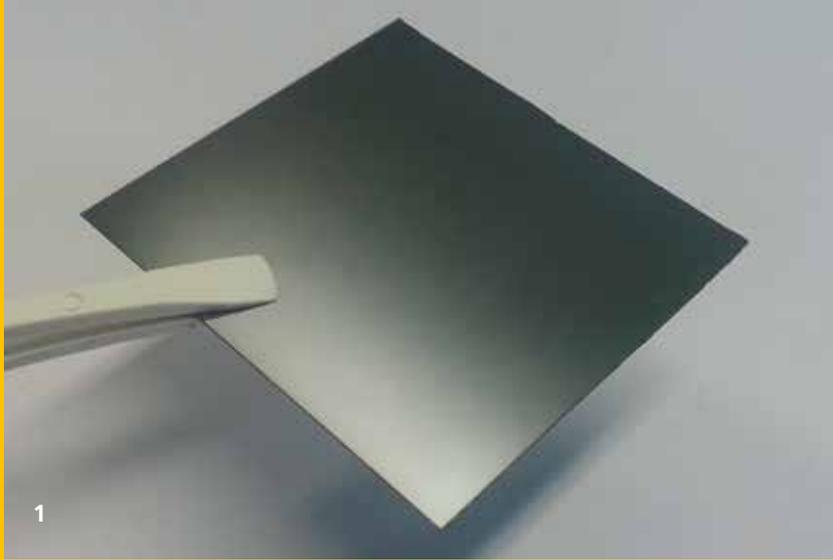
2 Optische Mikroskopaufnahme des Kratzmusters mit isolierten, periodischen Kratzern auf einer polierten Cz-Siliciumscheibe. Die Kratzer wurden hinsichtlich ihrer Geometrie analysiert, um die Abtragsrate zu ermitteln.



3 Ramanmap zur Analyse der Materialspannung durch Auswertung der Wellenzahlverschiebung.

in Korrelation zum Kornverschleiß können wir Prognosen hinsichtlich der Werkzeug-Performance erstellen und den Einfluss der wichtigsten Sägeparameter auf den Abtragsprozess ermitteln, analysieren und optimieren. Die Analysemethode ist nicht nur auf das Wafering von Silizium anwendbar, sondern auch auf andere Hartmaterialien übertragbar.

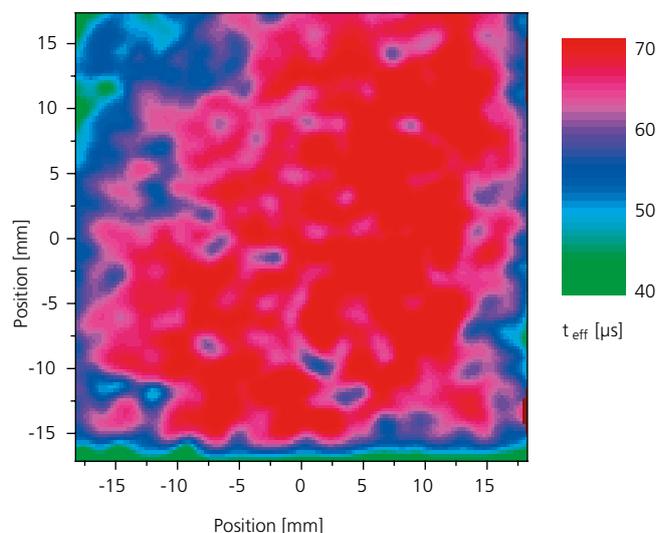
Das Projekt wurde durch den Europäischen Fonds für Regionale Entwicklung (EFRE), das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) sowie die Sächsische AufbauBank (SAB) gefördert.



SILICIUMFOLIEN FÜR DIE ANWENDUNG IN DER PHOTOVOLTAIK

Bei der Herstellung von Wafersolarzellen hat der Einsatz hochreinen Siliciums einen Kostenanteil von etwa einem Drittel. Eine Alternative zur Herstellung von Siliciumwafern durch Sägen ist die Silicium-Folientechnologie. Neben wesentlich geringeren Absorberdicken und weniger herstellungsbedingten Verlusten bietet dieser Ansatz auch mehr Flexibilität in der Absorberfläche. Wir können hierbei alle Prozesse entlang der Wertschöpfungskette abbilden, von der Herstellung der mehrlagigen porösen Siliciumschichten bis hin zur Ablösung von ultradünnen Folien. Unsere Schwerpunkte sind die Weiterentwicklung von Prozessen und Anlagen für größere Folienflächen und höhere Durchsätze.

Martin Arnold, Mario Drießen, Elke Gust, **Stefan Janz**, Nena Milenković, Thomas Rachow, Stefan Reber, Kai Schillinger, Andreas Bett



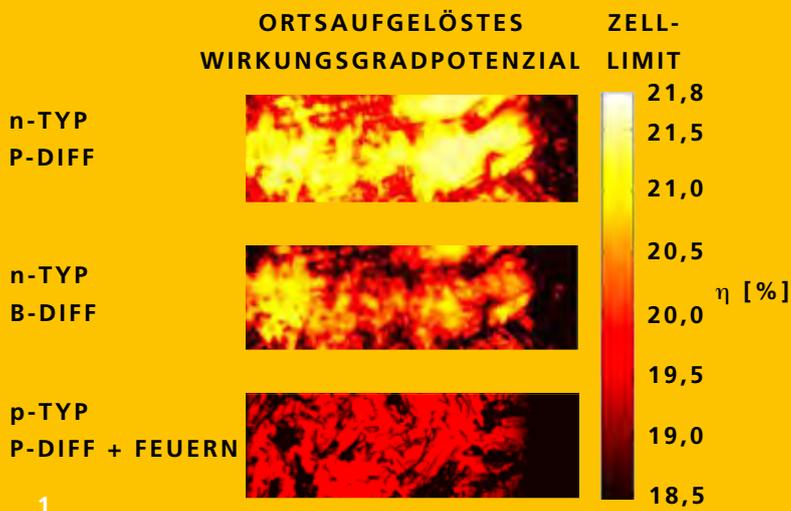
2 Ortsaufgelöste Minoritätsladungsträgerlebensdauer einer freistehenden Si-Folie von 30 μm Dicke nach nasschemischer Reinigung und beidseitiger Passivierung mit Aluminiumoxid, gemessen mit der Mikrowellen-Photoleitfähigkeitsmethode.

1 Dünne Siliciumfolie (30 μm), hergestellt mittels elektrochemischer Porosifikation eines Wafers, Reorganisation in Wasserstoffatmosphäre, Epitaxie und anschließendem vakuumunterstütztem Ablösen.

Wir entwickeln Prozesse und Technologien zur Herstellung dünner Siliciumfolien für Solarzellen mit einem Wirkungsgradpotenzial von mehr als 20 %. Diese Folien mit Dicken von wenigen zehn Mikrometern stellen wir her durch elektrochemische Porosifikation eines monokristallinen Siliciumkristalls in einer Inline-Anlage für Wafergrößen von 156 x 156 mm² und größer. Die anschließende Reorganisation sowie die epitaktische Verdickung der daraus entstehenden Kristallvorlage führen wir in der Atmosphärendruck-CVD-Anlage ProConCVD durch. Diese wurde für Probengrößen von bis zu 500 x 500 mm² entwickelt. Die etwa 30–50 μm dünne Si-Schicht wird danach mit einer vakuumunterstützten Ablöseanlage vom Trägersubstrat entfernt. Für die Herstellung von Solarzellen übertragen wir die flexiblen Folien nun entweder auf ein Keramiksubstrat oder prozessieren sie freitragend (siehe Abb. 1). Zur Bestimmung der Materialqualität werden die Folien nasschemisch gereinigt, beidseitig passiviert und anschließend mit der Mikrowellen-Photoleitfähigkeitsmethode (μ -PCD) gemessen (siehe Abb. 2).

Unseren Kunden bieten wir umfassende Service- und Entwicklungsleistungen zu allen Prozessschritten an: Substratauswahl, Porosifikation oder Implantation, Ausheilen und Reorganisieren der porösen Schichtstapel, epitaktische Abscheidung auf reorganisierten porösen Schichten, Ablösen und diverse Verfahren zum Transfer der Folien auf kostengünstige Substrate sowie angepasste Solarzellenprozesse.

Das Projekt wird durch interne Mittel und mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) finanziert.



POTENZIALANALYSE VON MULTI-KRISTALLINEM n-TYP SILICIUM

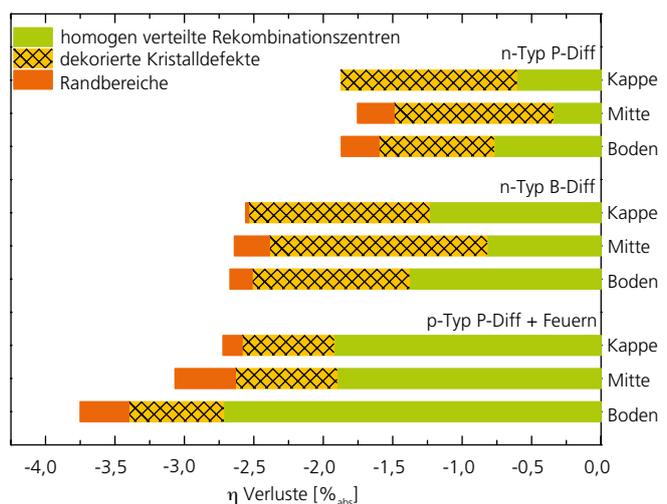
Monokristallines n-Typ Silicium findet in der Solarzellenproduktion besonders im Hocheffizienzbereich zunehmende Verbreitung. Durch die Vermeidung des schädlichen Bor-Sauerstoff-Defekts und die geringere Empfindlichkeit gegenüber den meisten metallischen Verunreinigungen hat n-Typ Silicium gegenüber Bor-dotiertem p-Typ Silicium Vorteile. Für multikristallines (mc) Silicium sind zwar die Wirkungsgradpotenziale geringer als für monokristallines Silicium, sie stehen aber deutlich geringeren Herstellungskosten gegenüber. Wir haben das Wirkungsgradpotenzial von mc n-Typ im Vergleich zu p-Typ Silicium analysiert. Durch die Verwendung spezieller für n- und p-Typ identisch kristallisierter Siliciumblöcke ist die Vergleichsstudie sehr aufschlussreich.

Bernhard Michl, Stephan Riepe, **Florian Schindler**,
Jonas Schön, Martin Schubert, Wilhelm Warta, Stefan Glunz

p- und n-Typ Parallelwafer aus unterschiedlichen Blockhöhen wurden verschiedenen typischen Solarzellenprozesssequenzen unterzogen: Bor-Diffusion (für n-Typ PassDop Zelle), Phosphor-Diffusion sowie Phosphor-Diffusion mit Feuerschritt (für p-Typ PERC Zelle). Durch orts- und injektionsabhängige Lebensdauerermessungen an passivierten Wafern und der Efficiency Limiting Bulk Recombination Analysis (ELBA) wurde die Limitierung der Solarzellen durch das Material ermittelt (Abb. 1). Trotz der geringeren Mobilität von Löchern sind die gemessenen Diffusionslängen im mc n-Typ deutlich höher als im p-Typ-Material. Für die analysierten Zellkonzepte liegen die durch das Material bestimmten Wirkungsgradobergrenzen für den n-Typ Block im Mittel um $+0,7\%_{\text{abs}}$ (nach B-Diffusion) bzw. um $+1,5\%_{\text{abs}}$ (nach P-Diffusion) über der des p-Typ Blocks.

Die ELBA-Methode erlaubt uns auch, die Ursache der Verluste aufzuschlüsseln (Abb. 2). Die höheren Wirkungsgradpotenziale

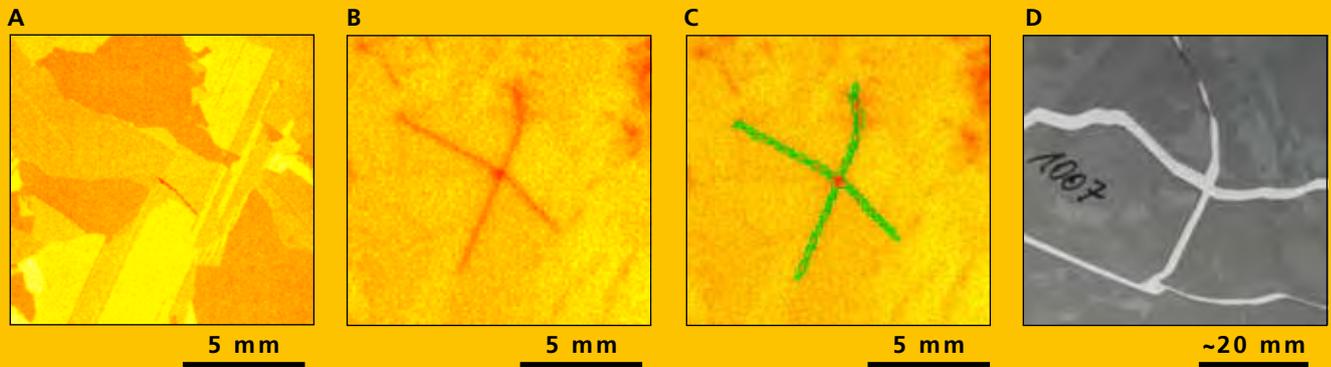
1 Das aus Lebensdauerermessungen bestimmte Wirkungsgradpotenzial ist für die prozessierten n-Typ Wafer deutlich höher als für die vergleichbaren p-Typ Wafer. Die größten Unterschiede findet man in guten Körnern.



2 ELBA-Analyse materialbedingter Verluste von unterschiedlich prozessierten n- und p-Typ Wafern aus verschiedenen Blockhöhen.

für Hocheffizienzzellen aus mc n-Typ Silicium ergeben sich hauptsächlich aus der höheren Toleranz gegenüber homogen innerhalb der Körner verteilten Rekombinationszentren. Die materialbedingten Verluste im konventionell hergestellten mc n-Typ Block werden hauptsächlich durch dekorierte Korngrenzen und Versetzungen verursacht, deren Einfluss durch das neue Herstellungsverfahren für »high performance multi« stark reduziert wird. Dadurch könnte das Wirkungsgradpotenzial von mc n-Typ-Hocheffizienzzellen noch weiter vergrößert werden.

Die Arbeiten werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen des Projekts »THESSO« unterstützt.

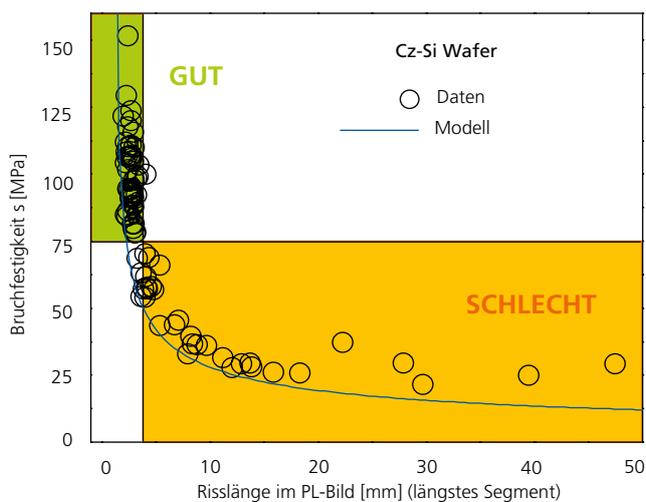


1

MIKRORISSE IN WAFERN UND ZELLEN: DETEKTION UND KLASSIFIZIERUNG

Da Mikrorisse im Wafer zu Waferbruch und zu Kurzschlüssen in der Zelle führen können, ist eine effiziente Mikroriss-Kontrolle entscheidend, um die Ausbeute in der Fertigungslinie zu steigern. Obwohl Infrarot-Durchlicht-(IR) und Photolumineszenz-(PL) Systeme als Inline-Messsysteme zur Verfügung stehen, werden Mikrorisse oft nicht konsequent kontrolliert. Ursache ist, dass es bisher keine robusten Klassierkriterien gibt und die Detektionsgenauigkeit der verwendeten Algorithmen limitiert ist. Wir haben mit maschinellen Lernverfahren einen robusten Detektionsalgorithmus und Bewertungskriterien entwickelt, die eine zuverlässige Identifikation kritischer mono- (Cz-Si) und multi- (mc-Si) kristalliner Wafer erlauben.

Matthias Demant, Sebastian Nold, **Stefan Rein**, Ralf Preu



2 Korrelation der Bruchfestigkeit von mono-kristallinen Wafern mit der Risslänge im Vergleich zu einem analytischen Modell mit abgeleitetem Klassierkriterium: Bei einer minimal geforderten Bruchfestigkeit von 75 MPa müssen Wafer mit Rissen ab 3,5 mm Länge aussortiert werden.

1 Mikroriss in einem multi-kristallinen Wafer: (A) IR-Aufnahme, (B) PL-Aufnahme vor und (C) nach Anwendung des Algorithmus zur Rissdetektion, (D) nach Belastung gebrochener Wafer.

Wie in Abb. 1 zu sehen ist, stellt die Detektion von Mikrorissen in mc-Si Wafern eine Herausforderung dar, da zusätzliche Defekte, wie Korngrenzen, ähnlich aussehende Störkontraste hervorrufen. Zur Verbesserung der Detektion wurden Algorithmen entwickelt, die die Struktur der Risse bei der Detektion berücksichtigen. Die Algorithmen wurden an einem umfangreichen Probensatz mit künstlich erzeugten Rissen mittels Lernverfahren trainiert, wodurch in PL-Bildern trotz Störkontrasten eine Präzision von bis zu 91 % und eine Erkennungsrate von bis zu 80 % erreicht werden. Obwohl die Detektion von Mikrorissen im IR-Bild aufgrund stärkerer Unterschiede zwischen Riss- und Störkontrasten leichter ist, ist die PL-Analyse quantitativ genauer, da Risse im IR-Bild häufig nicht in ihrer vollen Ausdehnung zu erkennen sind, wie Abb. 1A und B zeigen. Der entwickelte Algorithmus kann die Detektionsqualität unabhängig von der verwendeten Messtechnik steigern.

Für eine zuverlässige Bewertung von Mikrorissen muss aus den detektierten Rissgeometrien die Bruchfestigkeit abgeschätzt werden. Hierzu wurde die Bruchfestigkeit der untersuchten Wafer in einem 4-Balken-Biegeversuch bestimmt. Abb. 2 zeigt, dass die Festigkeit in Cz-Si Wafern mit zunehmender Risslänge systematisch abnimmt, was gut durch ein analytisches Modell der Bruchmechanik beschrieben wird und die Definition von scharfen Sortiergrenzen erlaubt. Für mc-Si Wafer ist die Korrelation weniger scharf, erlaubt aber immer noch die Identifikation sehr schlechter Wafer.

Das Projekt » μ -Zellen-2« wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt.



INLINE-FÄHIGE DICKENBESTIMMUNG DIELEKTRISCHER SCHICHTSTAPEL

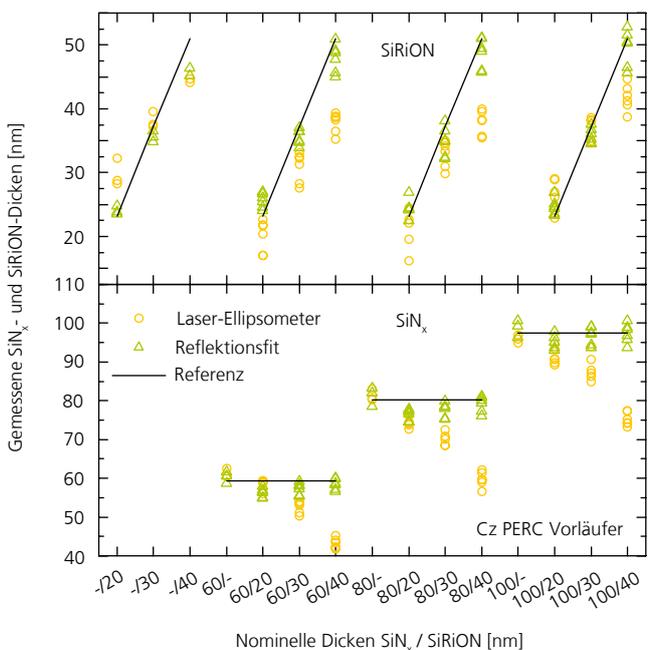
Ein vielversprechender Ansatz, den Wirkungsgrad von Solarzellen zu steigern, ist das PERC-Konzept (Passivated Emitter and Rear Cell), bei dem die Solarzellenrückseite mit typischerweise zwei dünnen Dielektrika beschichtet wird. Die Dicke der Schichten beeinflusst die elektrischen und optischen Eigenschaften dieser Solarzellen. Die übliche Methode zur Charakterisierung der Schichten ist die Ellipsometrie. Am Fraunhofer ISE wurde ein auf spektraler Reflexion basierendes Verfahren entwickelt, mit dem die Dicken von doppellagigen Dünnschichtsystemen im Gegensatz zur Ellipsometrie auch auf leicht mikro-rauen Oberflächen und im laufenden Solarzellenfertigungsprozess zuverlässig bestimmt werden können.

Johannes Greulich, Alexander Krieg, Stefan Rein, Nico Wöhrle, Ralf Preu

Die spektrale Reflexion der Rückseite von PERC-Solarzellenvorläufern hängt entscheidend von den Brechungsindizes und Dicken der abgeschiedenen Dielektrika ab und kann aus diesen Daten berechnet werden. Dieser Umstand kann zur Dickenbestimmung genutzt werden, indem die berechnete Reflexion R_{sim} an die nach der Schichtabscheidung gemessene Reflexion R_m angepasst wird. Bei der Berechnung werden die Brechungsindizes als gegeben vorausgesetzt und die Dicken der beiden Dielektrika variiert, bis die beste Anpassung von R_{sim} an R_m erreicht ist.

Die Methode wurde an PERC-Solarzellenvorläufern getestet. Diese weisen Doppelschichten unterschiedlicher Dicken aus Siliciumreichen Silicium-Oxynitrid (SiRiON) und aus Siliciumnitrid (SiN_x) auf (Abb. 2). Die Schichtdicken wurden mit einem Laser-Ellipsometer und mit dem Kurvenanpassungsverfahren an die spektrale Reflexion bestimmt. Mit einem Spektral-Ellipsometer wurden Referenzmessungen an auf planen Proben abgeschiedenen Einzelschichten durchgeführt.

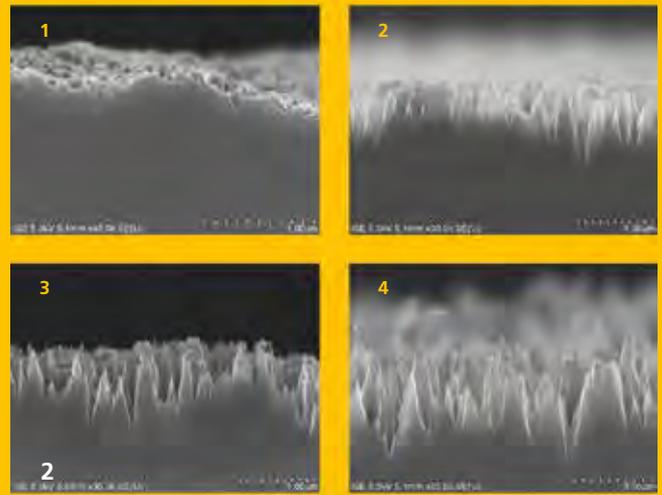
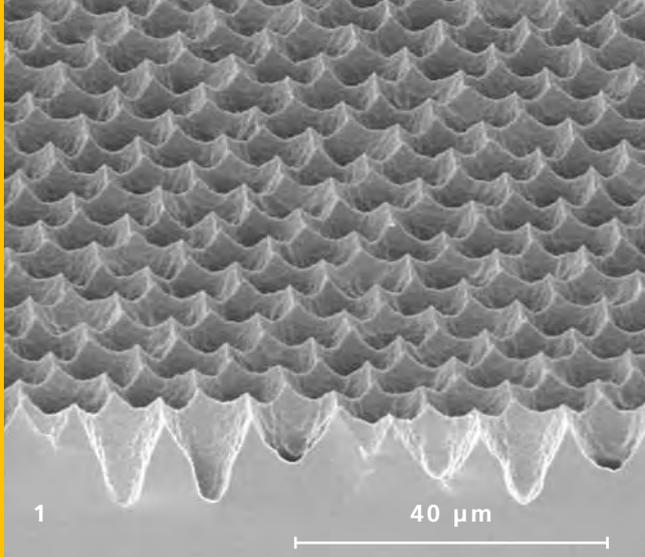
1 Rückseite eines PERC-Solarzellenvorläufers mit Stapelschicht, aus dessen Reflexionseigenschaften im laufenden Fertigungsprozess die Dicke der Einzelschichten bestimmt werden kann.



2 Die an PERC-Vorläufern mit Stapelschichten aus der Reflexion bestimmten Schichtdicken stimmen deutlich genauer mit der Referenz (Spektral-Ellipsometrie an planen Proben mit Einzelschichten) überein als die mittels Laser-Ellipsometrie bestimmten Dicken.

Die mit Laser-Ellipsometer bestimmten Dicken weichen systematisch nach unten (SiN_x) bzw. nach oben (SiRiON) ab, wohingegen das auf der Reflexion basierende Verfahren eine höhere Genauigkeit ohne systematische Abweichungen hat (Abb. 2). Es ist daher für die Dickenbestimmung dünner Stapelschichten von PERC-Solarzellen im laufenden Fertigungsprozess geeignet.

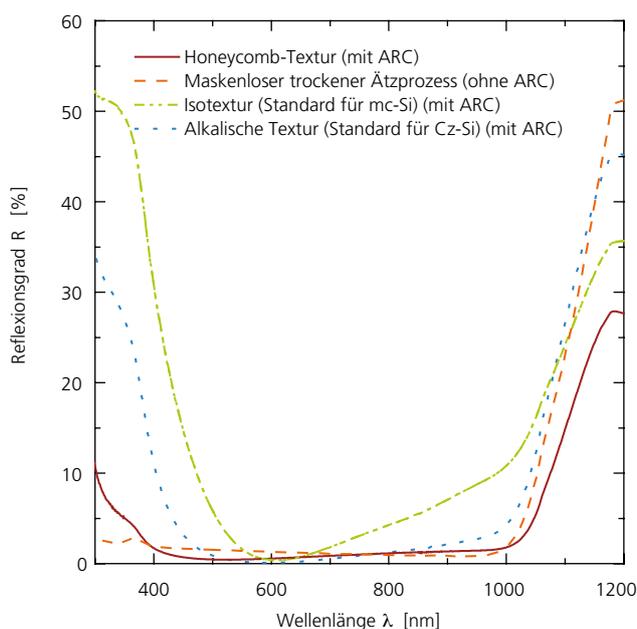
Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Projekt »QUASSIM-PLUS« unterstützt.



EFFEKTIVE ENTSPIEGELUNGSTEXTUR FÜR MULTIKRISTALLINE OBERFLÄCHEN

Die Effizienz multikristalliner Siliciumsolarzellen kann durch eine verbesserte vorderseitige Oberflächen-texturierung, die die Reflexionseigenschaften optimiert, gesteigert werden. Mikrometerskalige Honigwabentexturen wurden bereits für die Weltrekord-Solarzelle des Fraunhofer ISE auf mc-Si-Material eingesetzt. Mit den hier vorgestellten Verfahren kann diese Technologie nun auch industriell umgesetzt werden. Nanoskalige Black-Silicon-Texturen ermöglichen noch niedrigere Reflexionswerte von unter 5 %. Mit den beiden Texturierungsverfahren konnte das Fraunhofer ISE Solarzellen mit erhöhtem Wirkungsgrad herstellen.

Benedikt Bläsi, **Hubert Hauser, Marc Hofmann**, Bishal Kafle, Jochen Rentsch, Daniel Trogus, Nico Tucher, Anne-Kristin Volk, **Martin Zimmer**, Ralf Preu



3 Reflexionsgrad von Si-Oberflächen mit verschiedenen Texturen. Nur die Black-Silicon-Textur erreicht ohne Antireflexionsschicht sehr niedrige Reflexionswerte.

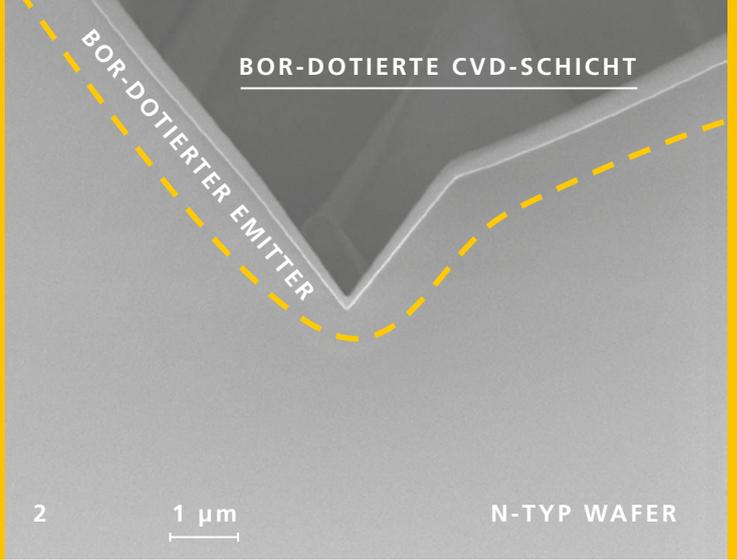
1 Honigwabentextur eines kristallinen Siliciumwafers. Alle verwendeten Prozesse wurden auf Hochdurchsatzanlagen entwickelt.

2 Nanoskalige Black-Silicon-Textur: mit der gelben Nummerierung erhöht sich die Tiefe der geätzten Strukturen, gleichzeitig verringert sich der gewichtete Reflexionsgrad.

Multikristalline Siliciumsolarzellen haben trotz geringerem Wirkungsgrad als monokristalline Solarzellen den größten Anteil am Weltmarkt. Dafür ist der niedrigere Herstellungspreis maßgeblich. Der Effizienzunterschied kann durch eine verbesserte Vorderseitentexturierungstechnologie für multikristalline Solarzellen deutlich verringert werden. Dies wurde durch den am Fraunhofer ISE im Jahr 2004 auf kleiner Fläche erreichten Weltrekord für multikristalline Siliciumsolarzellen gezeigt. Wir haben nun die hierbei verwendete Honigwabentextur mit hochdurchsatzfähigen Prozesstechnologien hergestellt. Dabei wurden großflächige Nanoimprint-Lithographie, Plasmaätzen und nasschemisches Ätzen so kombiniert, dass geringe Reflexionswerte und ein hohes Effizienzpotenzial erreicht wurden. Bei den hergestellten großflächigen Solarzellen im Industriemaßstab ($156 \times 156 \text{ mm}^2$) wurden Wirkungsgrade bis 17,8 % erreicht, was eine Steigerung der Effizienz um 0,5 %_{abs} gegenüber dem Referenzprozess bedeutet.

Alternativ dazu haben wir mit Kooperationspartnern einen maskenlosen trockenen Ätzprozess zur Texturierung entwickelt, bei dem klimafreundliches F_2 -Gas eingesetzt wird und der durch den plasmalosen Aufbau bei Atmosphärendruck sehr kompakte Anlagenmaße ermöglicht. Durch sehr geringe Si-Abträge im Bereich $0,5 \mu\text{m}$ bis $1,6 \mu\text{m}$ können sehr niedrige gewichtete Reflexionswerte von unter 5 % erreicht werden.

Die Arbeiten wurden durch die Europäische Union und durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) unterstützt.



POCl₃-BASIERTE CO-DIFFUSIONSPROZESSE FÜR n-TYP SI-SOLARZELLEN

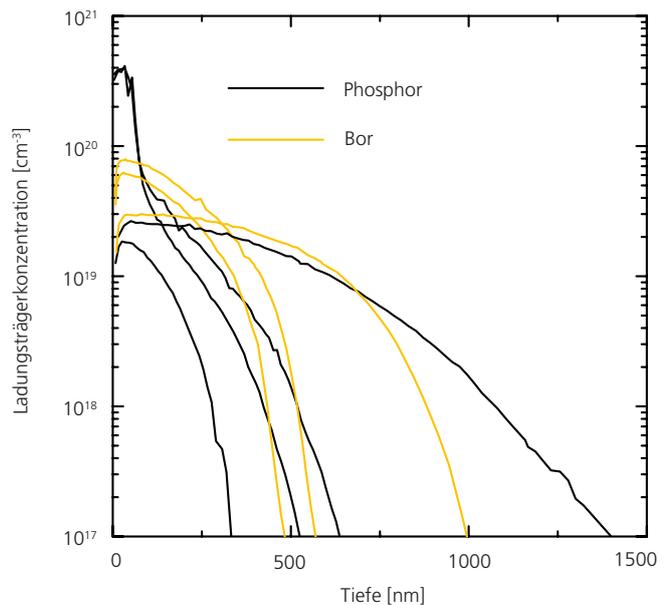
Eine Möglichkeit zur weiteren Steigerung des Wirkungsgrads von Si-Solarzellen ist der Einsatz von n-dotiertem Silicium. Hierbei werden z. B. bi-faziale Solarzellenstrukturen (Abb. 1) oder Rückkontaktsolarzellen eingesetzt. Solche n-Typ Solarzellen weisen meist zwei oder mehr unterschiedlich dotierte Bereiche auf. Um Kosten zu senken können Co-Diffusionsprozesse genutzt werden, bei denen die benötigten Dotierbereiche in einem einzigen Hochtemperaturschritt erzeugt werden. Am Fraunhofer ISE wurden für bi-faziale Solarzellen und Rückkontaktsolarzellen Co-Diffusionsprozesse entwickelt, die auf der Verwendung von konventioneller, weit verbreiteter POCl₃-Rohröfen-Technologie beruhen. Dadurch ist eine einfache Markteinführung möglich.

Daniel Biro, Roman Keding, Sebastian Meier, Philip Rothardt, **Andreas Wolf**, Ralf Preu

Der Ansatz des Fraunhofer ISE ist, bereits in der Produktion genutzte Anlagen für die Weiterentwicklung von industrietauglichen Diffusionsprozessen zu verwenden. In einem einzigen Prozessschritt können nun simultan mehrere Bor- und Phosphor-dotierte Bereiche erzeugt werden. Bei bi-fazialen Solarzellen wird dazu eine Bor-dotierte Oxidschicht einseitig auf den Wafer aufgebracht. Für Rückkontaktsolarzellen wird zunächst eine Phosphor-dotierte Schicht auf die Zellrückseite aufgebracht und strukturiert, gefolgt von der Abscheidung der Bor-dotierten Schicht. In beiden Fällen erfolgt anschließend die Diffusion in einem konventionellen Quarzrohröfen. Die zuvor aufgebrachten Quellen dienen dabei zur Erzeugung des Bor-dotierten Emitters (Abb. 2) und – bei Rückkontaktsolarzellen – auch des Phosphor-dotierten Rückseitenfelds. Auf der unbeschichteten Seite des Wafers wird gleichzeitig Phosphor aus der POCl₃-haltigen Gasphase eindiffundiert. So wird das Phosphor-dotierte Rückseitenfeld der bi-fazialen Solarzelle bzw. die vorderseitige leichte

1 Vorderseite (links) und Rückseite (rechts) einer bi-fazialen n-Typ Si-Solarzelle.

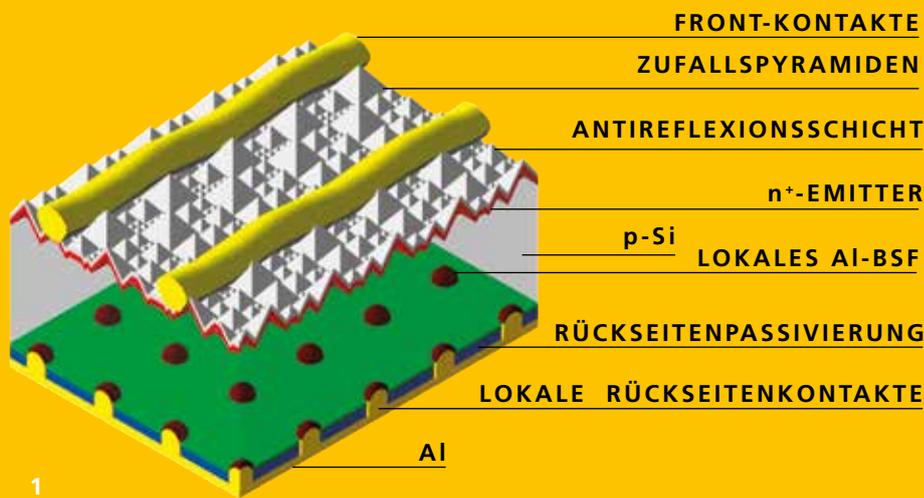
2 REM-Aufnahme eines Querbruchs, der die Bor-dotierte Schicht und den durch Co-Diffusion erzeugten Bor-dotierten Emitter zeigt.



3 Verschiedene Phosphor- und Bor-Dotierprofile erzeugt in Co-Diffusionsprozessen.

Phosphor-Dotierung der Rückkontaktsolarzelle erzeugt. Mit unseren Co-Diffusionsprozessen ist es möglich, verschiedenste Dotierprofil-Verläufe weitgehend unabhängig herzustellen (Abb. 3). Derartige bi-faziale Solarzellen erreichen Wirkungsgrade von 19,9 % (n-Typ Cz-Si Wafer, 156 mm Kantenlänge). Kleinformatige Rückkontaktsolarzellen erzielen Wirkungsgrade bis 21,6 % (n-Typ Cz-Si Wafer, 4 cm² Aperturfläche).

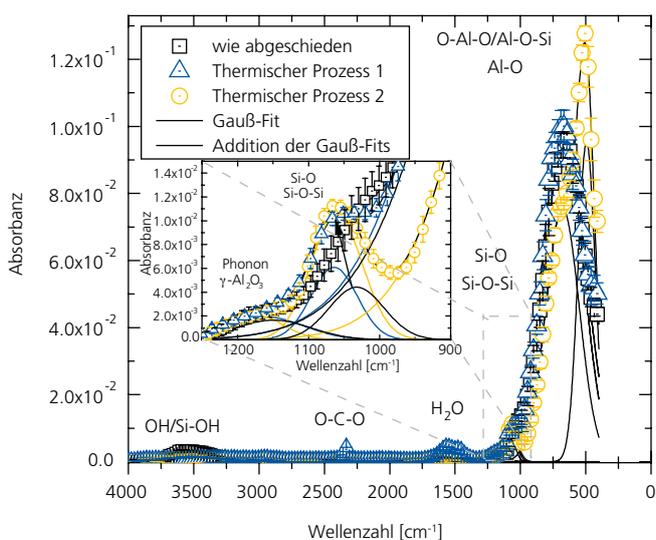
Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) von der Europäischen Union im Projekt »HERCULES« unterstützt.



CHARAKTERISIERUNG VON ALUMINIUM-OXID-PASSIVIERERSCHICHTEN

Durch effiziente Oberflächenpassivierung wird der Wirkungsgrad kristalliner Siliciumsolarzellen wirkungsvoll gesteigert. Insbesondere dünne Aluminiumoxidschichten (Al_2O_3) sind zur Oberflächenpassivierung hervorragend geeignet und werden zunehmend auch industriell eingesetzt. Die Charakterisierung von Al_2O_3 -Schichten aus z. B. unterschiedlichen Prozessbedingungen ist essenziell zur Entwicklung effizienter und robuster industrieller Al_2O_3 -Abscheidungsprozesse. Am Fraunhofer ISE steht dazu eine Vielzahl von Charakterisierungsverfahren zur Verfügung, die die Untersuchung optischer, struktureller oder elektrischer Eigenschaften ermöglichen.

Jonas Haunschild, Hannes Höfler, **Marc Hofmann**,
Saskia Kühnhold, Pierre Saint-Cast, Dirk Wagenmann,
Ralf Preu



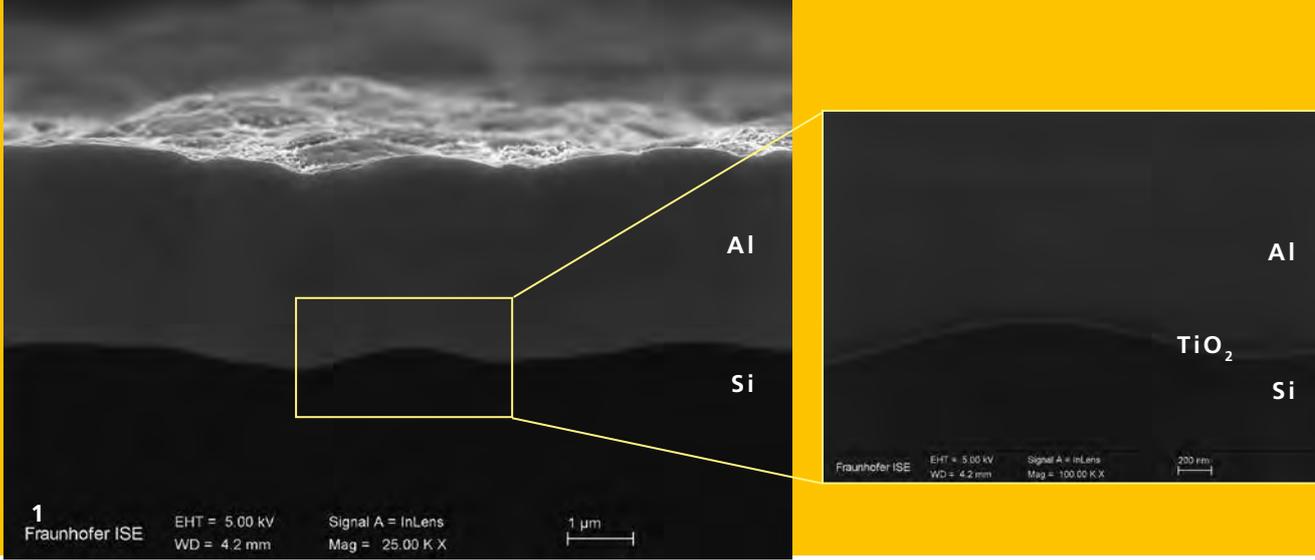
2 Abhängigkeit der Grenzflächenzustandsdichte D_{it} und der Oxidladungsdichte Q_{tot} von der PECVD- Al_2O_3 -Schichtdicke. Al_2O_3 -Schichten werden über Temper- ($\sim 425^\circ\text{C}$) bzw. Feuerprozesse ($\sim 800^\circ\text{C}$) aktiviert.

1 Struktur einer PERC-Solarzelle.

Die hocheffiziente PERC-Solarzellenstruktur (Passivated Emitter and Rear Cell) wird zunehmend industriell produziert. Eine Al_2O_3 -Passivierschicht ist dabei meist wesentliches Element für die Effizienzsteigerung der Solarzellen. Am Fraunhofer ISE wurde der erste industriell einsetzbare Al_2O_3 -Beschichtungsprozess entwickelt. Die Al_2O_3 -Passivierschicht hat eine Schichtdicke im Bereich weniger zehn Nanometer. Die Grenzfläche zum c-Si-Substrat und die Eigenschaften des Al_2O_3 -Volumens spielen eine entscheidende Rolle für die Passivierungswirkung.

Die elektrische Güte der Passivierung kann über Ladungsträgerlebensdauer messmethoden wie QSSPC (Quasi-Steady State Photo Conductance) oder MW-PCD (Microwave Photo Conductance Decay) untersucht werden, deren räumliche Verteilung besonders gut durch Photolumineszenzverfahren ermittelt wird. Eine Quantifizierung der Grenzflächen- und Feldeffekt-Passivierungseigenschaften kann mit Capacitance-Voltage- (CV) bzw. Corona Oxide Characterization of Semiconductor- (COCOS) Messungen durchgeführt werden. Die optischen Eigenschaften der Passivierungsschicht können über spektroskopische Ellipsometrie, chemische Bindungsverhältnisse durch Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie- (FTIR) Messungen charakterisiert werden.

Das Fraunhofer ISE verfügt über eine Vielzahl zusätzlicher Charakterisierungsmöglichkeiten, die im Bedarfsfall genutzt werden können. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter sind durch ihre Erfahrung in der Prozessentwicklung sowie der Schichtcharakterisierung in der Lage, effizient potenzielle Beschichtungsprobleme zu erkennen und Lösungsansätze zu erarbeiten.



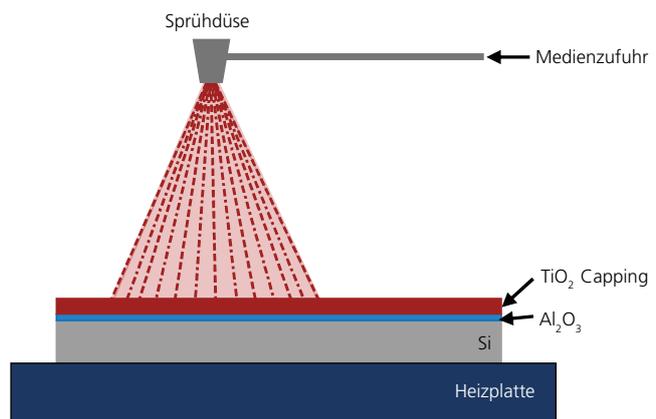
CAPPINGLAYER FÜR PASSIVIERUNGSSCHICHTEN DURCH SPRÜHPYROLYSE

Für hocheffiziente Solarzellenstrukturen ist Atomlagen-Abscheidung (ALD) von Al_2O_3 eine vielversprechende Passivierungsmethode. Allerdings ist die Abscheiderate gering und die Passivierungseigenschaften werden durch anschließende Metallisierungsprozesse beeinflusst. Daher ist es sinnvoll, mit einem Schichtstapel zu arbeiten, um die Anforderungen hinsichtlich Passivierung und optischen bzw. Diffusionsbarrieren-Eigenschaften zu trennen. So ist es möglich, eine dünne Al_2O_3 -Schicht zu erzeugen und darauf eine geeignete Capping-Schicht abzuschneiden, die gute optische und abschirmende Eigenschaften hat und günstig mit nasschemischen Prozessen zu erzeugen ist. Metalloxide, die als Solgel durch Sprühpolymerisation aufgetragen werden, sind hierfür eine interessante Option.

Christoph Fleischmann, Markus Glatthaar, **Sybille Hopman**, Wilhelm Hördt, Martin Lieder, Henning Nagel, Stefan Glunz

Ein Solgel ist eine kolloidale Dispersion aus Precursoren (meist Metallalkoholate), die in organischen Lösemitteln gelöst sind. Da es eine Vielzahl von möglichen Precursoren gibt, die man als Solgel für derartige Schichtsysteme nutzen kann, muss das optimale Capping-Schichtsystem für die jeweilige Anwendung gefunden werden. Der Prozess zur Erzeugung einer Capping-Schicht mittels Sprühpolymerisation ist schematisch in Abb. 2 gezeigt. Abhängig vom eingesetzten Precursor kann die gewünschte dielektrische Schicht aufgebracht werden. Sie wird dann auf ihre Ladungsträgerlebensdauer untersucht und für ihre Eignung als Isolationsschicht, ihr Verhalten in Ablations- und Feuerprozessen und ihre optischen Eigenschaften optimiert. Eine Capping-Schicht muss pin-hole frei sein, damit es zwischen Metallisierung und Silicium zu keinem Kontakt kommen kann. Außerdem darf es während Feuerprozessen nicht zu Wechselwirkungen zwischen Capping-Schicht und Metallen kommen, d. h. sie muss ebenfalls als Diffusions-

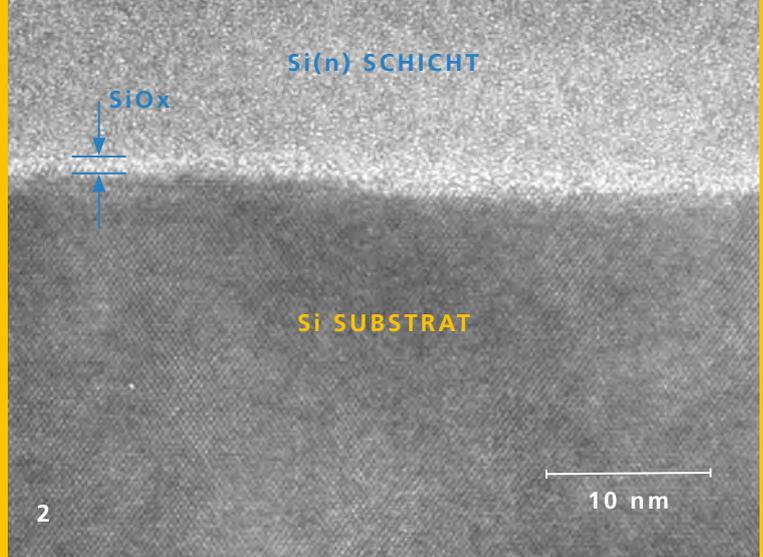
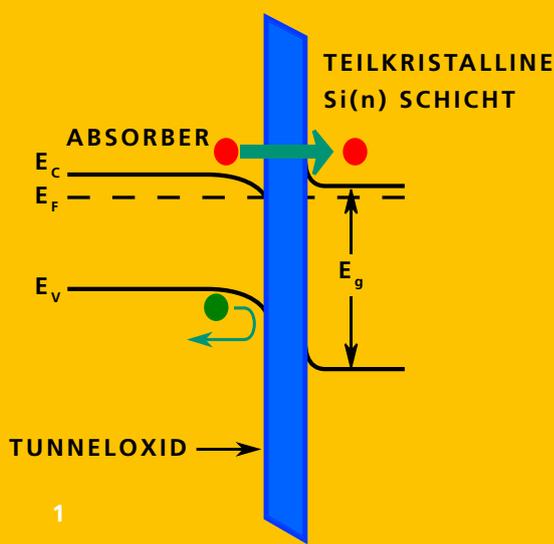
1 REM-Aufnahme eines Siliciumwafers mit einer TiO_2 -Beschichtung und einer Aluminiummetallisierung. Das Bild zeigt eine homogene TiO_2 -Beschichtung mit einer Dicke von 40 nm trotz unebener Oberflächenmorphologie.



2 Schematische Darstellung der Sprühpolymerisation: Der Siliciumwafer liegt auf einer Heizplatte. Mit einer Sprühdüse wird das TiO_2 -Solgel auf die heiße Oberfläche gesprüht. Das Lösemittel verdampft und die organischen Bestandteile werden ausgebrannt.

barriere fungieren. REM-Aufnahmen zeigen die homogene Abscheidung mittels Sprühpolymerisation dieses TiO_2 -Solgels auf ein heißes Siliciumsubstrat (Abb. 1). Die Schichtdicke der hier aufgetragenen TiO_2 -Schicht liegt bei 40 nm.

Lebensdaueruntersuchungen auf Siliciumproben mit ALD Al_2O_3 -Beschichtung und TiO_2 -Capping-Schicht, die als Solgel durch Sprühpolymerisation abgeschieden wurde, erzielten bislang gute Ergebnisse. Nach Metallisierung und anschließendem Feuerschritt blieb die Lebensdauer auf gleich gutem Niveau, so dass wir dieser Technologie große Chancen in der Solarzellenproduktion einräumen.



TUNNELOXIDE FÜR HOCHEFFIZIENTE PASSIVIERTE KONTAKTE (TOPCON)

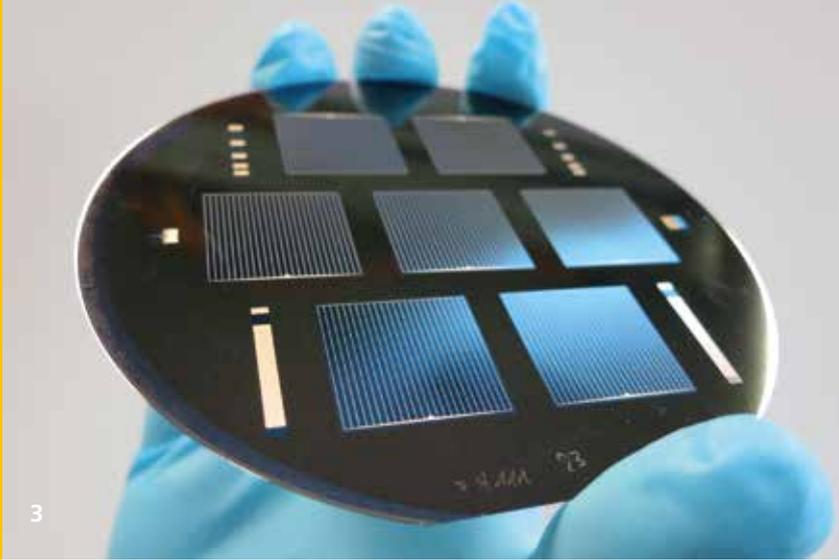
Ladungsträgerselektive Kontakte ermöglichen höchste Solarzellenwirkungsgrade. Das Herzstück des am Fraunhofer ISE entwickelten passivierten TOPCon-Kontakts ist ein ultradünnes Tunneloxid, das die Siliciumoberfläche passiviert und gleichzeitig einen verlustarmen Transport des Stroms ermöglicht. Durch Verwendung eines alternativen Oxidationsverfahrens, das auf UV-Strahlern basiert, konnte die Qualität des Tunneloxids verbessert und eine kostengünstige Prozesstechnologie zur industriellen Herstellung des TOPCon-Kontakts gefunden werden.

Jan Benick, Martin Bivour, **Frank Feldmann**, Martin Hermle, Laurent Kroely, Antonio Leimenstoll, **Anamaria Moldovan**, Christian Reichel, Jochen Rentsch, Felix Schätzle, Christian Schetter, Sonja Seitz, Harald Steidl, Nadine Weber, Martin Zimmer, Karin Zimmermann, Ralf Preu, Stefan Glunz

Um den Wirkungsgrad von Siliciumsolarzellen zu steigern, kommt der Reduzierung von Rekombinationsverlusten, besonders an den Metall / Halbleiterkontakten, eine wachsende Bedeutung zu. Eine Möglichkeit besteht darin, die Kontaktfläche auf kleine Kontaktpunkte zu reduzieren und die restliche Oberfläche mittels einer dielektrischen Schicht zu passivieren. Dieses sogenannte PERC-Konzept (Passivated Emitter and Rear Cell) wird aktuell erfolgreich in der Solarzellenindustrie umgesetzt. Nachteil dieses Ansatzes ist die notwendige lokale Strukturierung der Rückseite, die zum einen einen weiteren Prozessschritt mit sich bringt und zum anderen den Strompfad innerhalb des Wafers verlängert, was wiederum zu Wider-

standsverlusten in der Solarzelle führt. Durch die Verwendung von ganzflächigen selektiven Kontakten (passivierte Kontakte) können diese Nachteile vermieden und höhere Wirkungsgrade erreicht werden.

Der am Fraunhofer ISE entwickelte passivierte Kontakt TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) basiert auf einem ultradünnen Tunneloxid und einer dünnen Siliciumschicht, die dank ihrer größeren Bandlücke eine exzellente Ladungsträgerselektivität ermöglicht. Für die Qualität des TOPCon-Kontakts ist die Tunneloxidschicht von zentraler Bedeutung. Die Anforderungen an diese Schicht sind sehr hoch, da sie zum einen die Rekombination von Minoritätsladungsträgern unterdrücken und zum anderen einen verlustfreien Transport der Majoritätsladungsträger ermöglichen muss. Zudem darf das Oxid bei dem anschließenden Ausheiltemperprozess der Siliciumschicht nicht degradieren. Der Prozess findet bei Temperaturen zwischen 700 und 900 °C statt und stellt wichtige Eigenschaften, wie Oberflächenpassivierungsqualität und Kontaktwiderstand, ein. Darüber hinaus ermöglichen sehr hohe Ausheiltemperaturen von 900 °C die partielle Kristallisation der Siliciumschicht. Dies verbessert die optische Transparenz der Schichten und ermöglicht die Anwendung der TOPCon-Technologie auch auf der Solarzellenvorderseite. Solch hohe Ausheiltemperaturen können allerdings auch zur Zersetzung des Tunneloxids und damit zur Depassivierung der Oberfläche führen. Bei den laufenden Entwicklungen wurde neben der standardmäßigen nasschemischen Oxidation auch die Möglichkeit einer Trockenoxidation mittels UV-Strahler evaluiert, die eine kostengünstige und elegante Alternative

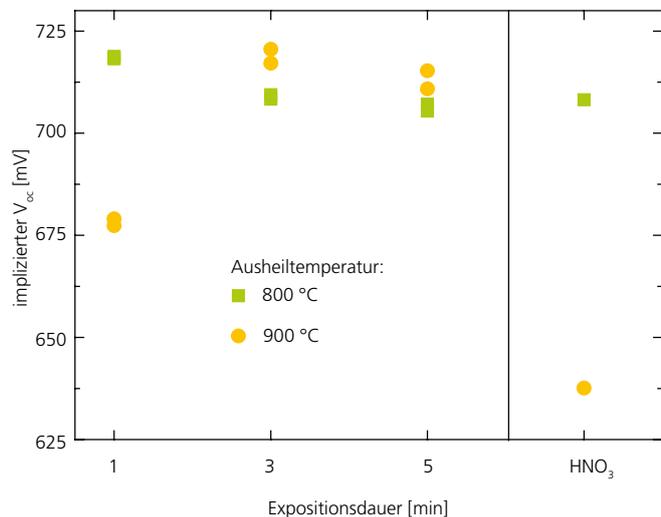


darstellt. Hierbei wird ein Excimerstrahler verwendet, der monochromatische Strahlung der Wellenlänge 172 nm emittiert. Dies induziert die Dissoziation von molekularem Sauerstoff und erzeugt atomaren Sauerstoff und Ozon als stark oxidierende Spezies für die Oxidationsreaktion. Im Vergleich zum nasschemischen Standardprozess ermöglicht die trockene UV/O₃-Oxidation verbesserte Passiviereigenschaften, besonders bei Proben mit texturierten Oberflächen und bei erhöhten Temperaturen während des Ausheilens der hochdotierten Siliciumschicht. Somit verbessert die UV/O₃-Oxidation nicht nur die Passivierung des TOPCon-Kontakts, sondern ermöglicht auch dessen Anwendung auf der Vorderseite einer Solarzelle.

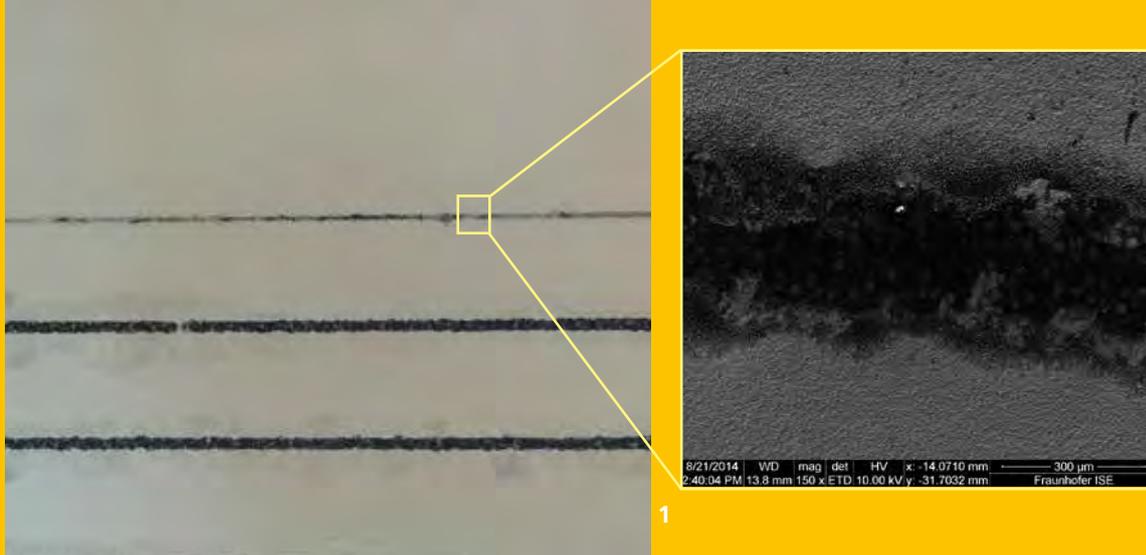
Eine Analyse der stöchiometrischen Eigenschaften der Tunneloxide mittels Röntgenphotoelektronenspektroskopie (XPS) zeigt, dass die trockenchemisch gewachsenen Oxide einen höheren Anteil an oxidreichen Suboxidspezies, die nahe an der Struktur von stöchiometrischen SiO₂ liegt, aufweisen. Dies lässt vermuten, dass die höhere Stabilität beim Ausheilschritt auf ein weniger schnelles Aufbrechen des Oxids aufgrund der begünstigten Stöchiometrie zurückzuführen ist. Durch die Integration des entwickelten ganzflächigen TOPCon-Rückseitenkontakts in eine beidseitig kontaktierte n-Typ Solarzelle mit einem optimierten diffundierten vorderseitigen Bor-Emitter konnten wir einen neuen Wirkungsgradrekord von 24,4 % für diesen Zelltyp erreichen und damit eindrucksvoll das Potenzial des TOPCon-Konzepts aufzeigen.

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

- 1 Schematische Darstellung des Banddiagramms der TOPCon-Struktur.
- 2 Transmissionselektronenmikroskopische (TEM) Aufnahme der TOPCon-Struktur (erstellt am Gemeinschaftszentrum für Elektronenmikroskopie (GFE) in Jülich).
- 3 Siliciumwafer mit sieben 2 x 2 cm² großen Solarzellen, deren maximaler Wirkungsgrad 24,4 % beträgt.



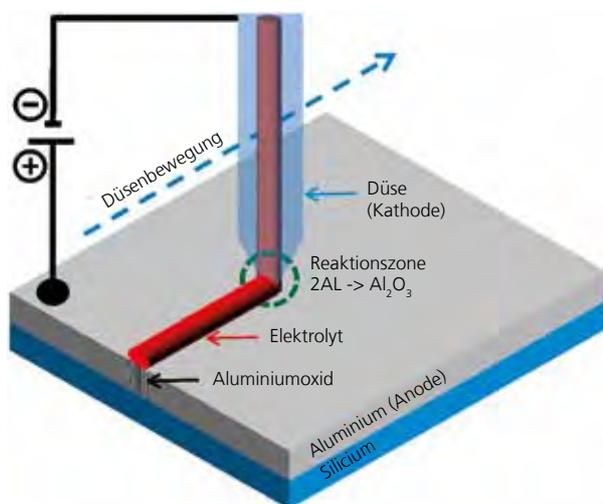
- 4 Implizierte Offenklemspannung des passivierten Kontakts auf texturierten Oberflächen in Abhängigkeit von der Oxidherstellung sowie der Temperatur des Ausheilschritts.



ELEKTROCHEMISCHE STRUKTURIERUNGSPROZESSE FÜR SOLARZELLEN

Si-Solarzellen der neuesten Generation, die ein hohes Effizienzpotenzial haben, benötigen oft zweidimensionale Strukturen, die möglichst kostengünstig erzeugt werden müssen. Unser Ziel ist, die bisher etablierten aufwendigen Prozesse durch schnelle elektrochemische Prozesse zu ersetzen. In der Elektrochemie besteht neben der Reduktion, z. B. bei der Metallabscheidung, die Möglichkeit, Materialien zu oxidieren und damit aufzulösen bzw. umzuwandeln. Die Strukturierung dünner Schichten, z. B. Aluminium, ist mit solchen oxidativen Verfahren schnell und effektiv in nur einem Schritt möglich. Dadurch werden Kosten gesenkt und Perspektiven für neue Zellkonzepte eröffnet.

Jonas Bartsch, Florian Clement, Raphael Efinger, Markus Glatthaar, **Mathias Kamp**, Axel Maywald, Stefan Glunz

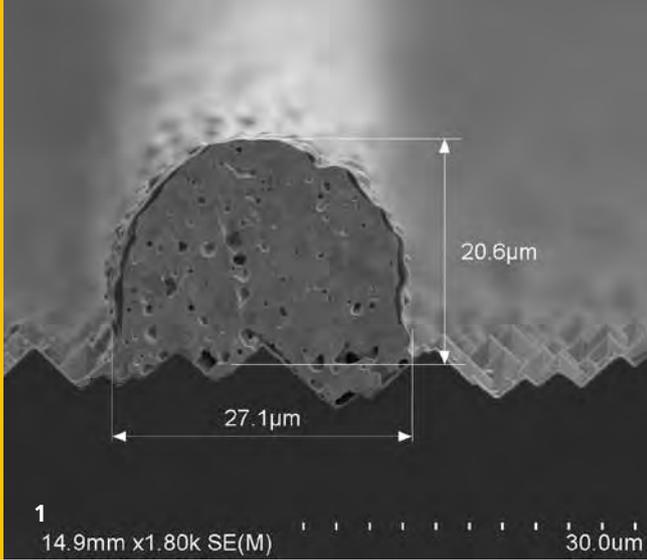


2 Prinzipskizze der elektrochemischen Strukturierung von Aluminium mittels elektrochemischem Dispensieren.

1 Prozessergebnis für verschiedene Vorschubraten sowie REM-Aufnahme eines elektrochemisch oxidierten Bereichs.

Im Bereich der Si-Solarzellen halten Rückseitenkontakt- (RSK-) Solarzellen den Rekord für den maximalen Wirkungsgrad. Die industrielle Umsetzung wird jedoch durch aufwendige, kostenintensive Metallstrukturierungsprozesse gehemmt. Das ideale Kontaktmaterial für RSK-Solarzellen ist aufgedampft Aluminium. Durch elektrochemische Verfahren ist es möglich, vollflächige Al-Schichten lokal zu bearbeiten und damit die Separation der Metallkontakte zu ermöglichen.

Am Fraunhofer ISE haben wir verschiedene elektrochemische Verfahren entwickelt und patentiert, die teure Maskier- und Ätzprozesse ersetzen können. Dazu gehören verschiedene Druckverfahren, bei denen das Druckwerkzeug als Kathode fungiert und entweder entsprechend strukturiert ist (Siebdruck, Tiefdruck) oder die gewünschte Struktur abfährt (Dispensieren, Abb. 2). Der Elektrolyt wird durch das elektrisch kontaktierte Druckwerkzeug auf das Substrat appliziert. Damit wird der Stromkreis geschlossen und der Oxidationsprozess findet in den gewünschten Bereichen statt. Je nach Wahl der Prozessparameter ist es möglich, eine elektrisch isolierende Al-Oxidschicht herzustellen oder das Al vollständig zu entfernen, um die Kontakttrennung durchzuführen. Der Gesamtprozess dauert nur wenige Sekunden. Es werden günstige, ungiftige Standardchemikalien verwendet, so dass das Verfahren für die industrielle Umsetzung attraktiv ist. Der Prozess läuft bei niedriger Temperatur ab und stoppt nach der Strukturierung automatisch am Si-Substrat. Nach der Strukturierung der Al-Schicht kann diese selbstjustierend elektrochemisch veredelt und zur Verbesserung der lateralen Leitfähigkeit verdickt werden.



FEINLINIENMETALLISIERUNG MIT NEUEM MULTINOZZLE-DISPENSER

Mit kontaktlosem Applizieren feinsten, homogener Kontaktfinger (Abb. 1) durch Feinlinien-Dispensieren ist es möglich, in nur einem Metallisierungsschritt die Abschattungsverluste auf der Vorderseite der Solarzelle gegenüber herkömmlichen Druckverfahren deutlich zu reduzieren, ohne dabei die Leitfähigkeit des Kontaktgitters zu beschränken. Um dieses Verfahren für eine industrielle Verwendung vorzubereiten, wurde im Rahmen des Projekts »Gecko« ein Dispensierautomat entwickelt, dessen zentrales Bauelement ein am Fraunhofer ISE konstruierter und gefertigter Multinozzle-Dispensdruckkopf ist (Abb. 2).

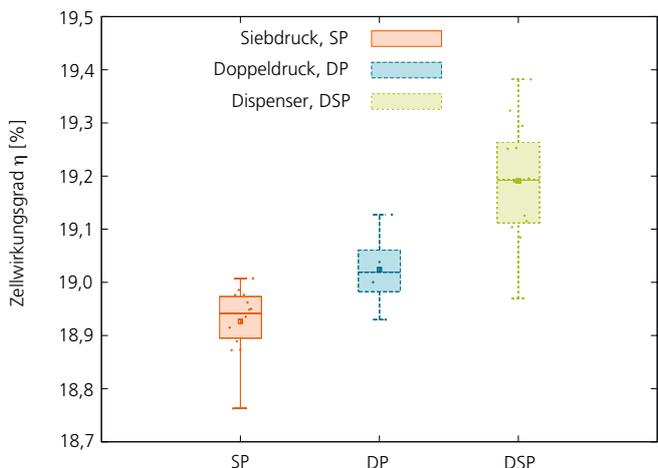
Daniel Biro, Florian Clement, Harald Gentischer, Markus Klawitter, Martin Kuchler, Felix Lorenz, Angel Padilla, **Max Pospischil**, Achim Rastelli, Carlos Rodriguez, Ralf Preu

Nach der erfolgreichen Evaluierung des Dispensverfahrens zur Feinlinienmetallisierung von Vorderseitenkontakten auf kristallinen Siliciumsolarzellen mit Zellwirkungsgraden bis zu 20,6 % auf MWT-PERC Strukturen wurde im Projekt »Gecko« diese neuartige Metallisierungstechnik zur industriellen Reife gebracht. Die angestrebten Produktionsdurchsätze erforderten die Entwicklung eines parallelen Dispensdruckkopfs, der sämtliche Kontaktfinger in einem Schritt applizieren kann und gleichzeitig ein Höchstmaß an Prozessstabilität ermöglicht.

Dazu wurden die zu applizierenden, hochgefüllten Metallpasten zunächst einer umfangreichen rheologischen Charakterisierung unterzogen. Auf dieser Basis wurde ein Simulationsmodell implementiert, mit dem Strömungszustände in Druckkopf und Düsen genauestens untersucht und die Entwicklung und Konstruktion von funktionstüchtigen Druckkopfprototypen forciert werden konnten. Das Ergebnis ist ein zentral gespeister, in der Größe beliebig skalierbarer Druckkopf mit zunächst zehn parallelen Düsen, der in der

1 REM-Aufnahme eines dispensierten Kontaktfingers auf einer kristallinen Solarzelle. Deutlich zu erkennen ist das hohe Aspektverhältnis der Kontaktfingergeometrie. Dies ermöglicht eine hohe Leitfähigkeit bei gleichzeitig geringer Abschattung.

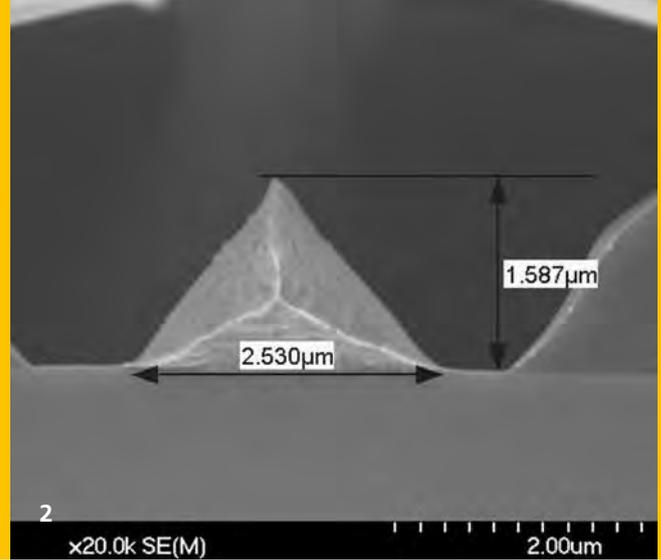
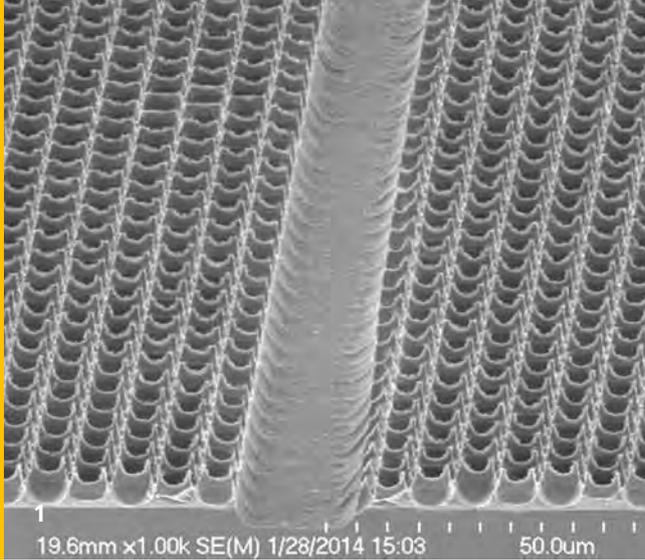
2 Neu entwickelter Dispensierautomat am Fraunhofer ISE, bestückt mit einem dort konstruierten und gefertigten Multinozzle-Dispensdruckkopf.



3 Wirkungsgrade von p-Typ Cz-Si Solarzellen mit Al-BSF Rückseite. Zur Vorderseitenmetallisierung wurden verschiedene Metallisierungsverfahren verglichen.

hauseigenen mechanischen Werkstatt des Fraunhofer ISE unter höchsten Präzisionsanforderungen gefertigt wurde. Ausgestattet mit aufwendiger Ventiltechnik und Sensorik wurde dieser Druckkopf in eine speziell für diese Anwendung entwickelte, Inline-fähige Dispensplattform integriert und wird seither erfolgreich zur Metallisierung von industriellen Solarzellen verwendet (Abb. 3).

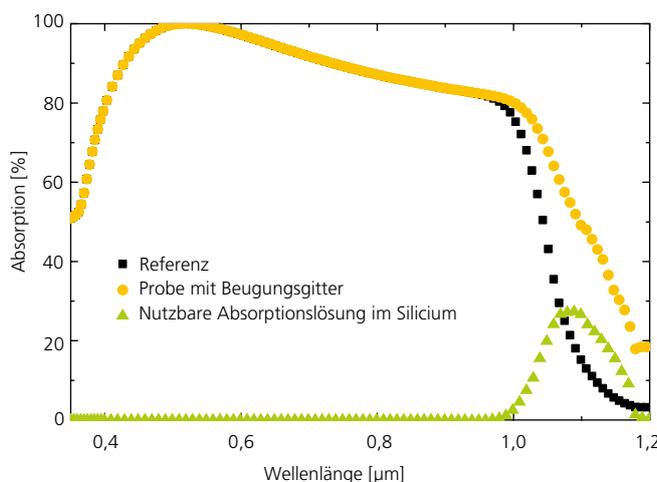
Das Projekt »Gecko« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und einem Industriekonsortium, bestehend aus den Firmen HERAEUS, MERCK und ASYS, unterstützt.



NANOIMPRINT-LITHOGRAPHIE FÜR HÖCHST-AUFGELÖSTE SOLARZELLENSTRUKTUREN

Die Miniaturisierung von Bauteilelementen ist wichtig für die Photovoltaik. Wir untersuchen Nanoimprint-Lithographie (NIL)-Prozesse, um z. B. feinste Strukturen für photonische Texturen oder sehr schmale Kontaktfinger mit definierten Geometrien zu realisieren. Dafür nutzen wir eine neue High-End-Anlage, die in einem Mask Aligner zur klassischen Photolithographie integriert ist. Damit können wir unter höchst definierten Bedingungen neue Prozesse entwickeln, die wir dann auf die eigens entwickelte Rollen-NIL-Anlage übertragen.

Simon Barke, Jan Benick, Benedikt Bläsi, Johannes Eisenlohr, Jan Christoph Goldschmidt, **Hubert Hauser**, Claas Müller*, Patrick Schneider, Sonja Seitz, Katharina Tokai, Nico Tucher, Christine Wellens, Werner Platzer (* IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg)



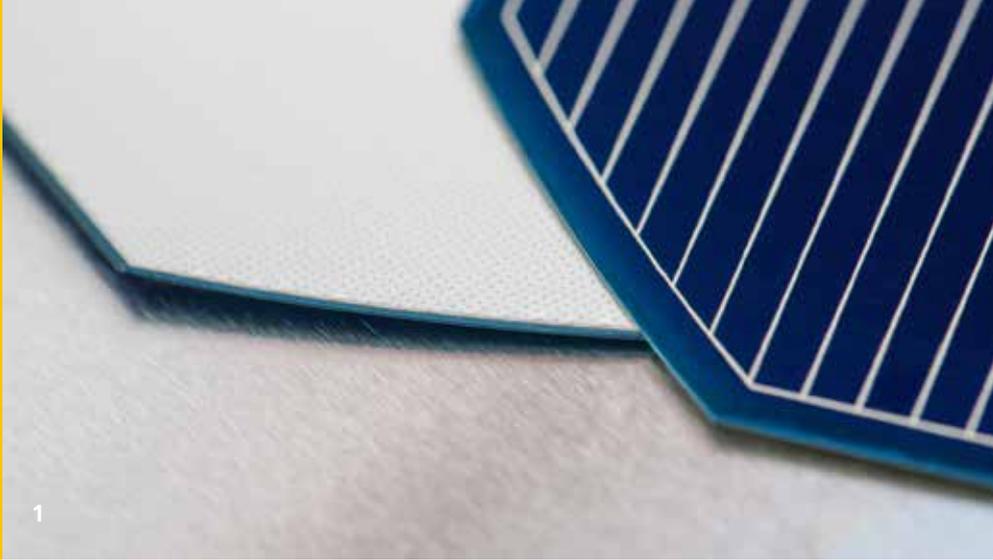
3 Absorptionsmessungen an 200 µm dicken Solarzellen-Precursoren (mit ARC und Rückseitenmetallisierung), bei denen der Effekt von rückseitigen Beugungsgittern im langwelligen Spektralbereich untersucht wurde. Die grüne Kurve zeigt die aus wellenoptischer Simulation extrahierte Absorptionserhöhung im Silicium.

- 1 REM-Aufnahme einer in Silicium übertragenen Struktur. Die genutzte Ätzmaske wurde mittels NIL in einem Prozessschritt übertragen. Die hexagonale Struktur (Honeycombtexur) hat einen integrierten Graben für die spätere Metallisierung.
- 2 Feinlinien-Metallkontakt mit prismatischem Profil, um effektiv die Abschattung über Reflexionseffekte zu minimieren.

In der PV benötigte Strukturauflösungen sind zwar deutlich größer als in der Mikroelektronik, durch NIL-Prozesse werden hier aber auch Neuerungen denkbar. Sie verbinden die Eigenschaften feinsten Strukturauflösungen, die sonst nur durch aufwendiges Elektronenstrahlschreiben möglich sind, mit großflächigen Replikationsverfahren mit sehr hohen Durchsätzen wie dem Rolle-zu-Rolle-Verfahren. Durch die Integration des neuen NIL-Tools der Firma EVG in einen Mask Aligner können verschiedenste höchst aufgelöste Strukturen in Produkte integriert werden, die bisher nur auf kleinsten Flächen im Labormaßstab möglich waren. Für die Herstellung der Masterstrukturen nutzen wir eine Kombination diverser lithographischer Verfahren, wie Interferenzlithographie, NIL, Heißprägen und Photolithographie sowie anisotrope Ätzprozesse. Von den Masterstrukturen können dann Stempel repliziert werden, so dass verschiedenste Charakteristika in einem einzigen NIL-Schritt repliziert werden können.

Im Fraunhofer-Eigenforschungsprojekt »PV-NIL« untersuchen wir Ätzmasken, die Geometrien für eine effiziente Textur und für feinste Kontaktfinger vereinen. Wir erforschen auch die Herstellung feinsten Kontaktfinger mit prismatischem Querschnittsprofil, um die effektive Abschattung zu minimieren.

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt »Fortes« nutzen wir hohe Strukturauflösungen, um Beugungsgitter in Solarzellen zu realisieren. Die neue Anlage zur NIL wurde mit strategischen Investitionsmitteln der Fraunhofer-Gesellschaft finanziert.



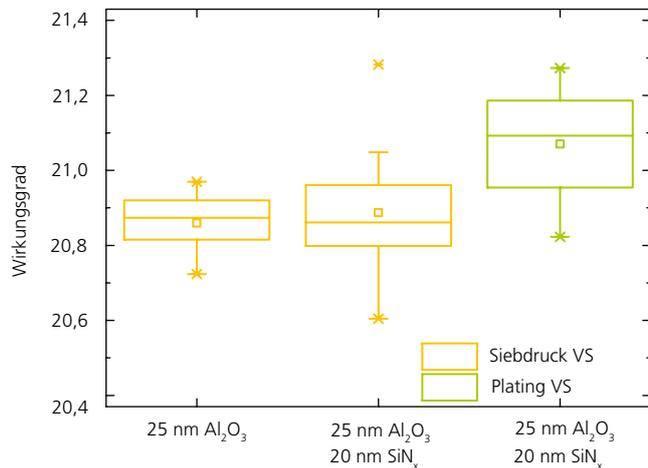
HOCHEFFIZIENZ-INDUSTRIESOLARZELLEN MIT FOLIENMETALLISIERUNG

Solarzellen mit passivierter Rückseite (PERC) ermöglichen höhere Wirkungsgrade im Vergleich zu konventionellen Zellen. Daher wird diese Technologie in Pilotfertigungen erprobt und vereinzelt bereits in die Massenfertigung überführt. Zusätzliche Prozessschritte machen sie aber komplexer und teurer, so dass der Kostenvorteil trotz höherer Effizienzen gering ist. Eine am Fraunhofer ISE entwickelte Technologie, bei der konventionelle Aluminiumfolie mittels Laserstrahlung mit dem Siliciumwafer verschweißt wird, vereinfacht den Herstellungsprozess von PERC-Zellen signifikant, bietet ein höheres Effizienzpotenzial und ist gleichzeitig deutlich günstiger.

Andreas Brand, Martin Graf, **Jan Nekarda**, Ralf Preu

Die Aluminiumfolie wird durch einzelne Laserpulse durch die Passivierschicht legiert und mit dem Silicium verschweißt. Die Kontaktpunkte stellen die mechanische und elektrische Verbindung zwischen Folienelektrode und Siliciumwafer her. Das Verfahren ermöglicht einen um bis zu 0,3 mA/cm² höheren Kurzschlussstrom aufgrund verbesserter optischer Eigenschaften. Gleichzeitig ist die Passivierschichtdicke um 75 % reduziert. Im Gegensatz zur standardmäßig verwendeten Elektrode aus gedruckter und gefeuerter Metallpaste beeinträchtigt die »kalte« Folienmetallisierung die Qualität der Passivierschicht weniger. Dies vereinfacht den Transfer der PERC-Technologien in bestehende Produktionslinien und ermöglicht höhere Offenklemmspannungen. Die Folienmetallisierung bietet zudem einen substanziellen Kostenvorteil, da die Materialkosten für die Elektrode sowie die Herstellungskosten der Passivierung gesenkt werden und mindestens zwei Fertigungsschritte im Produktionsprozess eingespart werden können.

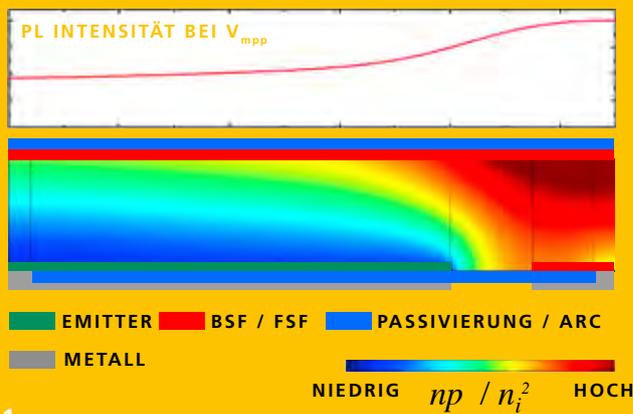
1 Rück- und Vorderseite der 156 x 156 mm² großen Industriesolarzelle mit rückseitiger Passivierschicht und aufgelaserter Elektrode aus konventioneller Aluminiumfolie.



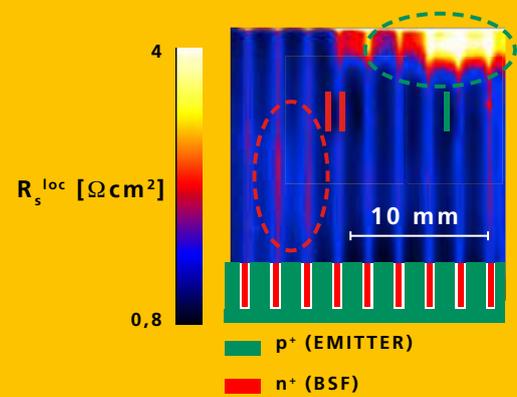
2 Wirkungsgrade industrieller, busbarloser PERC-Solarzellen mit rückseitiger Folienmetallisierung ohne oder mit reduzierter SiN_x-Schutzschicht auf der Rückseite und gedruckter / gefeuerter (gelb) oder galvanisch aufgewachsener (grün) Vorderseitenmetallisierung.

Jüngst wurde die Kompatibilität mit einer galvanisch abge- schiedenen Vorderseitelektrode gezeigt, die einen höheren Lichteinfang ermöglicht und ohne Silber auskommt. Ebenso konnte durch ein günstiges Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsver- fahren die Verschaltbarkeit derartiger Solarzellen mit konven- tioneller Verbindungstechnologie demonstriert werden.

Im laufenden Projekt »FolMet«, das vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) gefördert wird, konnten so bereits industriennahe Solarzellen ohne Silber mit reduzierter Rückseitenpassivierschicht und Wirkungsgraden >21 % hergestellt werden.



1

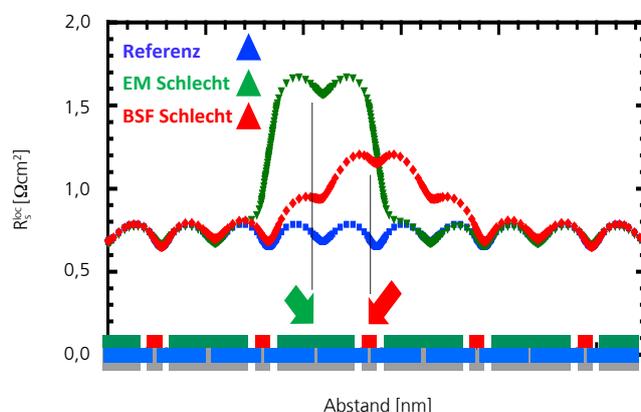


2

PHOTOLUMINESZENZBASIERTE CHARAKTERISIERUNG VON RÜCKSEITENKONTAKTZELLEN

Rückseitenkontaktzellen zeigen höchste Wirkungsgrade, zeichnen sich aber typischerweise durch komplexe Kontakt- und Dotierungsstrukturen aus. Dadurch spielen laterale Effekte für den Stromtransport eine erhebliche Rolle. Die bisherigen Analysemethoden konnten diese nur unzureichend ortsaufgelöst beschreiben. Das Fraunhofer ISE hat nun durch die Kombination von Simulationen und bildgebender Lumineszenzmessung einen quantitativen Zugang zu wichtigen, lateral stark variierenden Zelleigenschaften erzielt. So lassen sich Ladungsträgerrekombinationen an allen Grenzflächen sowie lokale Serienwiderstände detektieren und Ursachen für Leistungsverluste der Solarzellen identifizieren.

Nikolaus Hagedorn, Roman Keding, Sven Kluska, Milan Padilla, Christian Reichel, Martin Schubert, Wilhelm Warta, Stefan Glunz

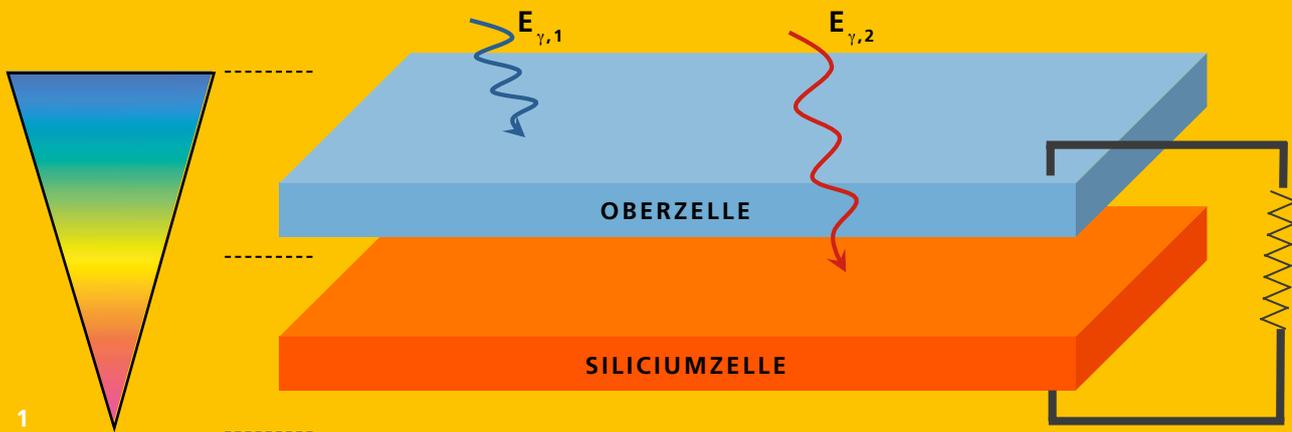


3 Simulation des lokalen Serienwiderstands im Fall eines einzelnen schlechten Emitter (EM)- oder Basiskontakts (BSF) im Querschnitt.

1 Modellierung des zu erwartenden Intensitätsprofils einer Photolumineszenzmessung unter V_{oc} -Bedingungen (oben) auf Basis einer Ladungsträgerdichtesimulation (unten), die unterschiedliche Oberflächenrekombinationen an der Vorderseite, den Kontaktbereichen sowie der Kontaktzwischenräume berücksichtigt.

2 Photolumineszenz-basierte Serienwiderstandsmessung in der Zellaufsicht, die sowohl erhöhten Kontaktwiderstand am Emitterkontakt (grün) als auch am Basiskontakt (rot) zeigt.

Höchste Zellwirkungsgrade können durch Rückseitenkontaktzellen mit komplexer Zellarchitektur erzielt werden. Diese Struktur erschwert die ortsaufgelöste Charakterisierung verschiedener Zellparameter. Signifikante laterale Stromflüsse, die besonders auch vom Ladungsträgertyp abhängen, haben einen großen Einfluss auf kamerabasierte Lumineszenzmessungen und stellen so hohe Anforderungen an die Auswertung dieser Messungen. Unser neuer Lösungsansatz liegt in der Kombination von mehrdimensionaler Zellmodellierung mit experimentellen Photolumineszenzanalysen. Die Modellierung der lokalen Ladungsträgerdichten ermöglicht z. B. die Simulation von in der Photolumineszenzmessung zu erwartenden Intensitätsprofilen (Abb. 1), um Informationen über die unterschiedlichen Oberflächenrekombinationsgeschwindigkeiten an der Zellvorderseite, Basis- und Emitterkontakt an der Zellrückseite zu erhalten. Durch Variation der modellierten Zellparameter kann das Ergebnis an die Messung angepasst werden und so die auftretenden Rekombinationsgeschwindigkeiten bestimmt werden. In analoger Weise lassen sich lokale Serienwiderstandsprobleme auf IBC-Solarzellen identifizieren und quantitativ bestimmen (Abb. 2 und 3). Die Modellierung der lateralen Stromflüsse beider Ladungsträgertypen ermöglicht die Bestimmung des lokalen Serienwiderstands aufgrund lokal begrenzter schlechter Emitter- und Basiskontakte. Mit unserer neuen Auswertung ist es nun möglich, lokale Rekombinations- und Kontaktprobleme zu identifizieren und quantifizieren, um eine zielgerichtete Zelloptimierung zu unterstützen.



WIRKUNGSGRAD ÜBER 30 % MIT SILICIUM-BASIERTEN TANDEM SOLARZELLEN

Tandemsolarzellen bestehen aus mehreren gestapelten Solarzellen aus unterschiedlichen Materialien. Haben diese Solarzellen unterschiedliche Bandlücken, kann nahezu jeder Teil des Sonnenspektrums ideal ausgenutzt werden. Dadurch lassen sich sehr hohe Wirkungsgrade erzielen. Um den Entwicklungsvorsprung von Silicium-solarzellen weiter zu nutzen, ist eine Tandemsolarzelle mit einer Siliciumsolarzelle, auf die III-V Halbleiter oder neuartige Perowskit-Solarzellen aufgebracht werden, die technologisch sinnvollste Weiterentwicklung für Wirkungsgrade über 30 %. Ein wichtiges Forschungsfeld ist dabei die Schnittstelle zwischen der Oberzelle und der Siliciumsolarzelle.

Jan Benick, Frank Dimroth, Stefanie Essig, Jan Christoph Goldschmidt, **Martin Hermle**, Andreas Hinsch, Stefan Janz, David Lackner, Welmoed Veurman, Stefan Glunz

Siliciumsolarzellen haben einen Marktanteil von ca. 90 % und einen hohen technologischen Reifegrad erreicht. Eine Möglichkeit, den Wirkungsgrad über das theoretische Limit für Siliciumsolarzellen von 29,4 % hinaus zu erhöhen, liegt in der Verwendung von Tandemsolarzellen, die aus mehreren, aufeinander gestapelten Solarzellen bestehen (Abb. 1). Durch die Verwendung von Silicium als unterste Solarzelle sind Wirkungsgrade von über 30 % möglich und man kann auf den hohen Entwicklungsstand der marktbeherrschenden Siliciumtechnologie aufbauen.

Am Fraunhofer ISE wurden bereits sehr erfolgreich Tandemsolarzellen mit einer Silicium-Basiszelle und einer darüberliegenden GaInP/GaAs-Solarzelle hergestellt. Die Si-Zelle und die III-V-Solarzelle wurden dabei separat hergestellt und dann mittels eines Halbleiterbonds elektrisch und mechanisch miteinander verbunden. Damit konnte in ersten Experimenten schon ein Wirkungsgrad von 25,6 %

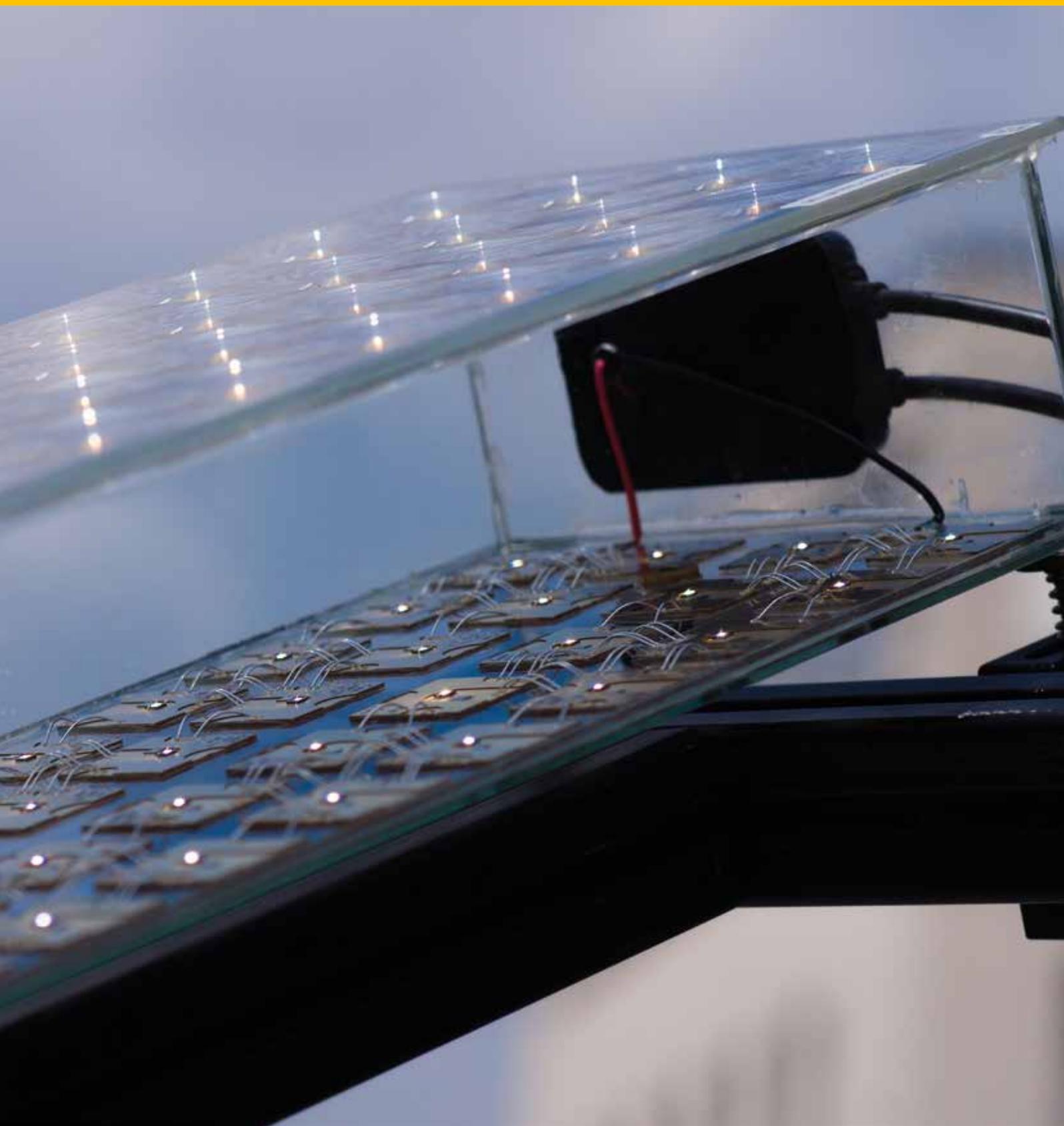
1 Schematische Darstellung des Tandemkonzepts mit einer Siliciumsolarzelle als Unterzelle. Die beiden Teilzellen absorbieren unterschiedliche Wellenlängenbereiche und können so die Photonenenergie ideal in elektrische Energie umwandeln. Damit sind theoretisch Wirkungsgrade > 40 % möglich. Für die Teilzellen, die auf der Siliciumsolarzelle aufgebracht werden, können III-V Halbleiter aber auch Perowskit-Solarzellen verwendet werden.

($V_{oc} = 2,89$ V) bei der Beleuchtung von einer Sonne realisiert werden. Neben dem Halbleiter-Bonding werden auch noch weitere Methoden zur Verbindung der Teilzellen evaluiert. Als Alternative zu den Solarzellen aus III-V-Halbleitern werden aktuell auch Perowskit-Solarzellen als obere Teilzellen untersucht. Perowskit-Solarzellen lassen sich sehr kostengünstig herstellen und ihr Wirkungsgrad wurde in wenigen Jahren auf über 19 % gesteigert. Darüber hinaus haben sie eine Bandlücke, die ideal für eine Tandemsolarzelle in Kombination mit einer Siliciumsolarzelle geeignet ist.

Für alle Tandemanwendungen mit Silicium als Basiszelle und einer seriellen Verschaltung ist die optimale Absorption in den Teilzellen von großer Bedeutung. Da der Photostrom in allen Teilzellen bei serieller Verschaltung gleich groß sein muss, ist ein optimierter Lichteinfang notwendig. Da die Vorderseite der Siliciumsolarzelle bei manchen Konzepten keine Textur aufweisen darf, entwickeln wir am Fraunhofer ISE optimierte, lichtlenkende Strukturen auf der Rückseite der Solarzelle, die den Lichtweg in Silicium stark erhöhen und damit eine maximale Absorption im Silicium ermöglichen.

Ziel der gesamten Entwicklungen ist, Solarzellen mit Wirkungsgrad über 30 % und Module mit Wirkungsgrad über 28 % zu realisieren, um eine neue Generation von siliciumbasierten Solarzellen zu entwickeln und so eine weitere Reduzierung der photovoltaischen Stromgestehungskosten zu ermöglichen.

III-V- UND KONZENTRATOR-PHOTOVOLTAIK



Das Fraunhofer ISE adressiert mit diesem Geschäftsfeld Anforderungen, die sich aus dem Weltraum- und dem terrestrischen Photovoltaikmarkt ergeben. Satelliten im Weltraum werden ausschließlich mit hocheffizienten III-V Mehrfachsolarzellen bestückt. Aufgrund der besonderen Bedingungen im Weltraum – wie der Beschuss des Materials mit hochenergetischen Elektronen und Protonen sowie die kostenintensive Beförderung der Satelliten in den Weltraum – entwickeln wir neue Solarzellenarchitekturen, die noch höhere Wirkungsgrade bei noch geringerem Gewicht erzielen. Auch bei konzentrierenden Photovoltaiksystemen auf der Erde bestimmen hohe Wirkungsgrade und Kostensenkung bei den Produktionsprozessen die Forschungsansätze. Der Marktanteil konzentrierender Photovoltaik ist mit ca. 100 MW/Jahr derzeit noch gering. Wir unterstützen unsere Kunden, um die Technologie und den Markt weiter zu entwickeln. Dazu arbeiten wir auch aktiv in den Normungsgremien der IEC mit.

Um höhere Wirkungsgrade und geringere Kosten zu erreichen, optimieren wir Prozesstechnologien, entwickeln Materialien und erarbeiten neue Fertigungstechnologien. Z. B. untersuchen wir für monolithisch gewachsene Fünf- und Sechsfachsolarzellen das Materialsystem GaInNAs und Al-haltige ternäre und quaternäre III-V Halbleiter. Für das metamorphe Wachstum von Schichten – hierbei wird Material mit unterschiedlichen Gitterkonstanten gewachsen – entwerfen wir geeignete Pufferstrukturen, auf denen wir hochqualitative Solarzellenstrukturen realisieren. Ein Beispiel für den Einsatz solcher Strukturen ist das Wachstum von Mehrfachsolarzellen auf Silicium. Langfristig sind solche Mehrfachsolarzellen auf Si auch für den Einsatz in Flachmodulen interessant.

Wafer-Bonding ist ein weiteres wichtiges Technologiethema. Hierbei werden Halbleiterschichten miteinander verbunden. Dies ermöglicht uns, unterschiedliche Halbleiter wie GaSb, GaAs, InP, Si oder Ge zu kombinieren. In diesem Jahr konnten wir erneut den Wirkungsgrad steigern und erzielten mit einer Wafer-gebondeten Vierfachsolarzelle den neuen Spitzenwert von 46,0 %. Die Rekordzelle wurde gemeinsam mit den Partnern Soitec und CEA-Leti entwickelt.

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

Um III-V Mehrfachsolarzellen terrestrisch zu nutzen, entwickeln wir hochkonzentrierende PV-Systeme. Dazu untersuchen und

qualifizieren wir optische Komponenten, die das Sonnenlicht um den Faktor 300–1000 konzentrieren, bevor es in der III-V Mehrfachsolarzelle in elektrische Energie gewandelt wird. Wir arbeiten an unterschiedlichsten Modulkonzepten, um höhere Wirkungsgrade und niedrigere Fertigungskosten zu erzielen. So konnten wir mit unserem FLATCON®-Modul einen neuen Weltrekordwirkungsgrad von 36,7 % unter Konzentrador-Standardtestbedingungen (CSTC) erzielen. In diesem Modul wurden erstmals Vierfachsolarzellen eingesetzt.

In unserem ConTEC (Concentrator Technology and Evaluation Center) untersuchen wir Modulfertigungsprozesse und -zuverlässigkeit und erarbeiten Qualitätssicherungskonzepte. Kunden nutzen unsere Kompetenzen im Bereich der thermischen, optischen und elektrischen Simulation und Charakterisierung. Wir optimieren und entwickeln Prozesse und innovative Systeme.

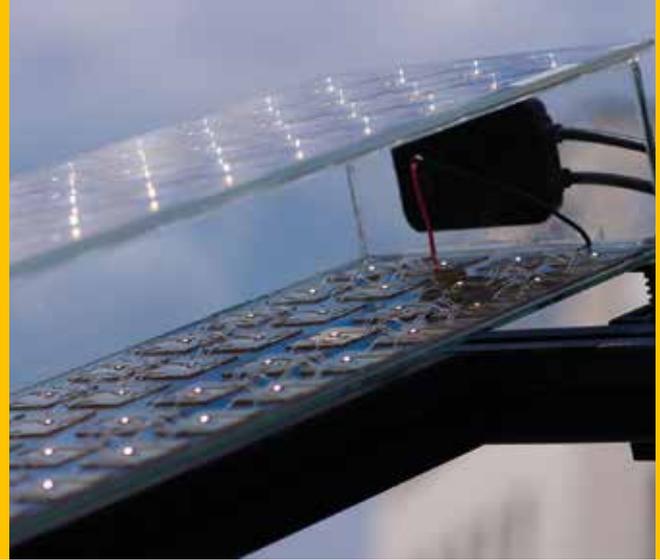
Wir arbeiten auch an niedrigkonzentrierenden Systemen. Diese decken den Konzentrationsbereich von Faktor 2–30 ab. Hier arbeiten wir zusammen mit unseren Kunden an der Entwicklung optischer Konzentratoren, der Montage von Solarzellen und Receivern, der Auslegung und Vermessung von Systemen. Im PV-TEC (Photovoltaik-Technologie Evaluations Center) können auch Serien an speziellen Si-Solarzellen für spezifische Kundenanwendungen produziert werden.

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	73
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	56
Zeitschriften- und Buchbeiträge	21
Vorträge und Konferenzbeiträge	49
Neu erteilte Patente	5

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



FLATCON® Konzentratormodul mit einem Wirkungsgrad von 36,7 %.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Andreas Bett

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

III-V Epitaxie und Solarzellen

Dr. Frank Dimroth

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

Konzentrator-Bauelemente

Maike Wiesenfarth M. Sc.

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

Konzentrator-Optik

Dr. Peter Nitz

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

Hochkonzentrierende Systeme (HCPV)

Maike Wiesenfarth M. Sc.

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

Niedrigkonzentrierende Systeme (LCPV)

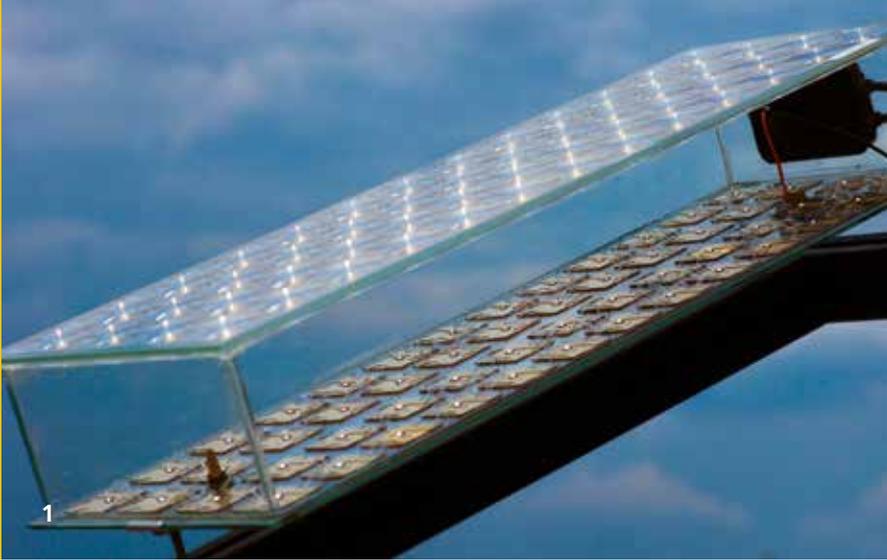
Maike Wiesenfarth M. Sc.

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

Silicium-Konzentratorsolarzellen

Dr.-Ing. Daniel Biro

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



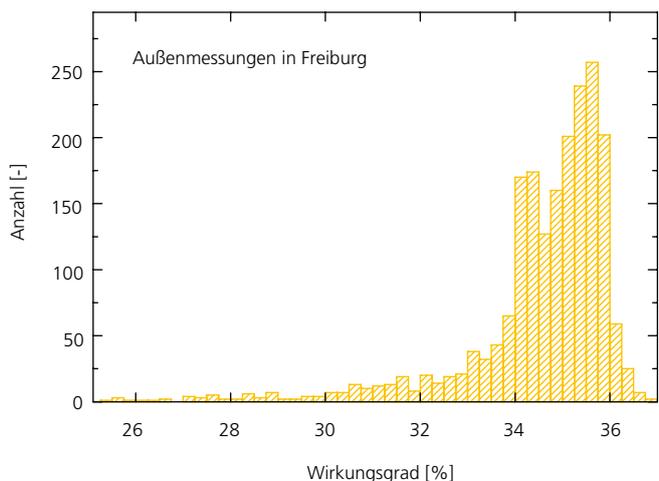
FLATCON® MODUL ERZIELT 36,7 % WIRKUNGS-GRAD MIT VIERFACHSOLARZELLEN

Ein Vorteil der Konzentratoren-Photovoltaik (CPV) sind die außerordentlich hohen möglichen Wirkungsgrade. Die Basis dafür sind Mehrfachsolarellen. Heute werden in kommerziellen CPV-Systemen Dreifachsolarellen eingesetzt. Neuartigere Solarellkonzepte basierend auf Vierfachsolarellen, wie wir sie am Fraunhofer ISE entwickeln, erzielen bereits wesentlich höhere Wirkungsgrade. Wir haben nun erstmals Vierfachsolarellen erfolgreich in das Fraunhofer ISE FLATCON® Modul integriert. Damit konnten wir einen weltweit unübertroffenen Wirkungsgrad für Solarmodule von 36,7 % erreichen.

Armin Bösch, Alexander Dilger, Frank Dimroth, Tobias Dörsam, Thorsten Hornung, Gerald Siefer, **Marc Steiner**, Maike Wiesenfarth, Andreas Bett

Die von uns entwickelten FLATCON® Konzentratormodule beinhalten Fresnellinsen, um das Sonnenlicht einige hundertfach auf Millimeter kleine, aber hocheffiziente Solarellen zu bündeln. Dadurch kann Solarellenmaterial eingespart werden. Kostengünstiger Einsatz von höchst leistungsfähigen Mehrfachsolarellen wird damit möglich. Mehrfachsolarellen bestehen aus einer beliebigen Anzahl übereinander angeordneter spezialisierter Teilsolarellen. Je mehr Teilsolarellen verwendet werden, desto effizienter ist die Ausnutzung des Sonnenlichts. In aktuellen CPV-Systemen werden derzeit Dreifachsolarellen eingesetzt, da diese industriell verfügbar sind. Wir haben mit den Kooperationspartnern Soitec und CEA-Leti Vierfachsolarellen hergestellt, die bis zu 46,0 % Wirkungsgrad erreichen. Die Verwendung solcher Vierfachsolarellen im Konzentratormodul kann die Energieausbeute deutlich erhöhen. Erstmals haben wir Vierfachsolarellen in unsere FLATCON® CPV-Module integriert (Abb. 1). Diese Module wurden auf unserem Außenmessstand – und damit unter Anwendungsbedingungen – elektrisch charakterisiert.

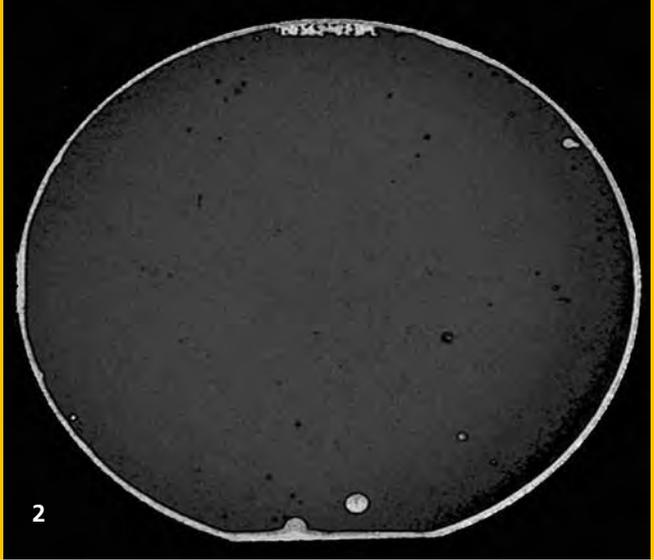
1 FLATCON® (Fresnel Lens All-Glass Tandem Cell Concentrator) Modul bestehend aus 52 Solarellen und Fresnellinsen-Paaren. Das Modul wurde am Fraunhofer ISE gefertigt. Die Ausrichtung der Zellen gegenüber der Linse mit Hilfe von speziellen Montagevorrichtungen ist entscheidend. Sie muss gewährleisten, dass alle 52 Linsen das Sonnenlicht direkt ins Zentrum der jeweiligen Solarelle bündeln.



2 Verteilung des elektrischen Wirkungsgrads eines FLATCON® Konzentratoren-Photovoltaikmoduls unter Verwendung von Vierfachsolarellen gemessen bei den jeweils vorherrschenden Umgebungsbedingungen am Fraunhofer ISE in Freiburg. Der Median der Verteilung beträgt 34,9 %. Der daraus ermittelte Wirkungsgrad bei standardisierten Testbedingungen ist 36,7 %.

In Abb. 2 sind die dabei gemessenen Wirkungsgrade im Zeitraum von April 2014 bis Mai 2014 als Histogramm dargestellt. Auf Basis dieser Charakterisierung konnte der Modulwirkungsgrad unter standardisierten Testbedingungen (Concentrator Standard Test Conditions: 1000 W/m² Sonneneinstrahlung, 25 °C Zelltemperatur) von 36,7 % abgeleitet werden.

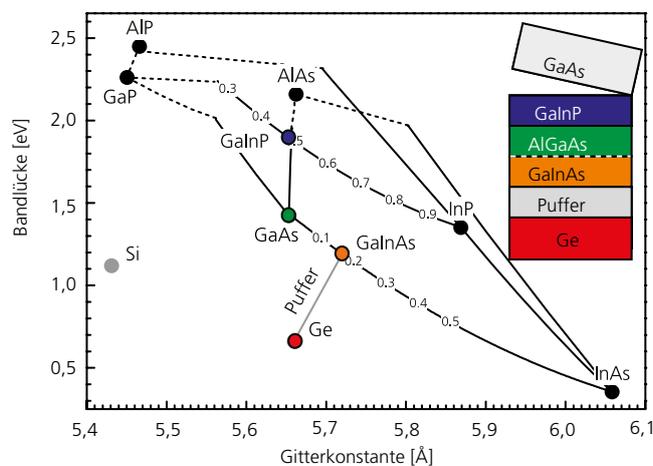
Das Projekt wurde teilweise vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützt.



HOCHEFFIZIENTE, GEBONDETE VIERFACH-SOLARZELLEN AUF GERMANIUM

Höhere Zellwirkungsgrade senken die Gesamtkosten von PV-Anlagen. Im Bereich der III-V Halbleitersolarzellen ist durch vielversprechende, neue Zellkonzepte ein Wirkungsgrad von 50 % in Reichweite gerückt. Dazu werden Solarzellen mit mindestens vier photoaktiven Teilzellen benötigt. Wir entwickeln hierfür ein kostengünstiges Konzept, basierend auf den III-V Verbindungshalbleitern GaInP, AlGaAs, GaInAs und Ge. Zwei Tandemzellen werden durch direktes Wafer-Bonden mit großer Kraft (10 kN) verpresst. Dies geschieht ohne Kleber oder andere Zwischenschichten. Dabei entsteht eine Verbindung, die mechanisch stabil ist und einen geringen elektrischen Widerstand aufweist (Abb. 2).

Frank Dimroth, David Lackner, **Markus Niemeyer**, Jens Ohlmann, Axel Panamatschuk, Sophie Stättner, Thomas Tibbits, Katrin Wagner, Alexander Wekkeli, Andreas Bett



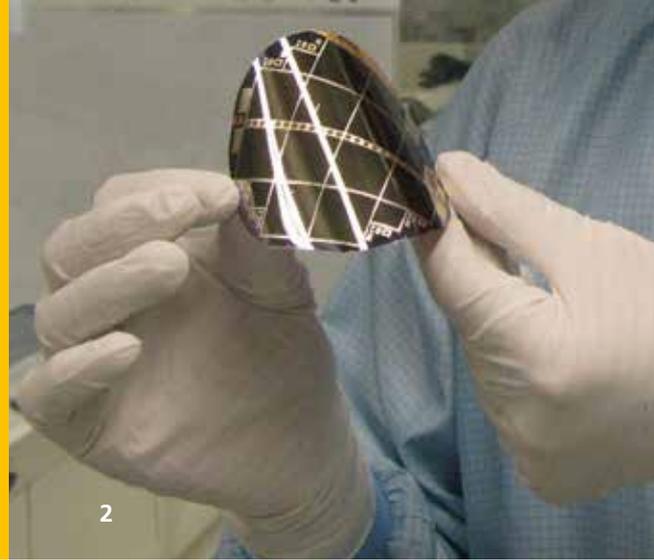
3 Bandlücken und Gitterkonstanten der III-V Verbindungshalbleiter. Eingezeichnet sind die in diesem Konzept verwendeten Teilsolarzellen und eine Skizze der Vierfachzelle mit photoinaktivem Puffer und dem durch weiße Striche angedeuteten Wafer-Bond.

- 1 Industriereaktor zum Abscheiden von III-V Halbleiterschichten. Gleichzeitig können bis zu acht 6" Substrate beschichtet werden.
- 2 Ultraschallbild eines 4" Wafer-Bonds zwischen einer oberen GaInP/GaAs- und einer unteren GaInAs/Ge-Tandemsolarzelle. Unverbundene Bereiche erscheinen weiß.

Solarzellen mit einem pn-Übergang sind theoretisch im Wirkungsgrad auf nur ca. 30 % limitiert. Durch Hinzufügen weiterer pn-Übergänge kann dieser Wert erhöht werden. Mit der richtigen Bandlückenwahl kann so mit vier pn-Übergängen auch praktisch ein Wirkungsgrad von über 50 % unter konzentriertem Licht erreicht werden. Höchste Effizienzen erzielen dabei Materialkombinationen aus III-V Verbindungshalbleitern wie GaAs oder GaInP.

Bei der metallorganischen Gasphasenepitaxie (Abb. 1) werden kristalline III-V Halbleiterstrukturen auf Substraten abgeschieden. Durch Abscheiden von Materialien gleicher Gitterkonstante wird die höchste Qualität erreicht. Die möglichen Bandlücken sind dabei aber stark eingeschränkt. Um Materialien mit unterschiedlicher Gitterkonstante zu kombinieren, nutzen wir zwei Methoden. Erstens werden Zellstrukturen auf zwei Substraten unterschiedlicher Gitterkonstante abgeschieden und durch Wafer-Bonden verbunden. Zweitens wird auf einem der beiden Substrate die Gitterkonstante langsam in einer Pufferschicht verändert, die selbst nicht photoaktiv ist. Durch geschicktes Pufferdesign sind entstehende Kristallfehler auf diesen Teil der Struktur begrenzt. So ist es möglich, Teilzellen nah an den optimalen Bandlücken zu kombinieren. Solche Vierfachsolarzellen erreichen bereits einen Wirkungsgrad von 34,5 % (AM1.5d, 1 Sonne). Diese Solarzellen werden künftig auch für den Einsatz unter konzentriertem Licht weiter entwickelt und versprechen dann höchste Effizienzen bis zu 50 %.

Das Vorhaben wird durch die Europäische Kommission im Rahmen des Projekts »NGCPV« unterstützt.



ULTRA-DÜNNE ZELLEN AUF METALLFOLIE MIT RECYCELBAREN SUBSTRATEN

Kostensenkungen bei hocheffizienten III-V Mehrfach-solarzellen können erreicht werden, wenn die wertvollen GaAs-Substrate recycelt und für das Wachstum von weiteren Solarzellen wiederverwendet werden. Hierfür entwickeln wir ein Verfahren, bei dem die ultra-dünne Solarzelle von ihrem Substrat durch selektives Ätzen abgetrennt wird. Die Stabilisierung der Zelle erfolgt durch eine dünne Metallfolie. Diese flexiblen Zellen können z. B. in niedrigkonzentrierenden PV-Systemen kostengünstig eingesetzt werden. Bei unseren Entwicklungsarbeiten kooperieren wir mit unseren Forschungspartnern am CEA-Leti und INES.

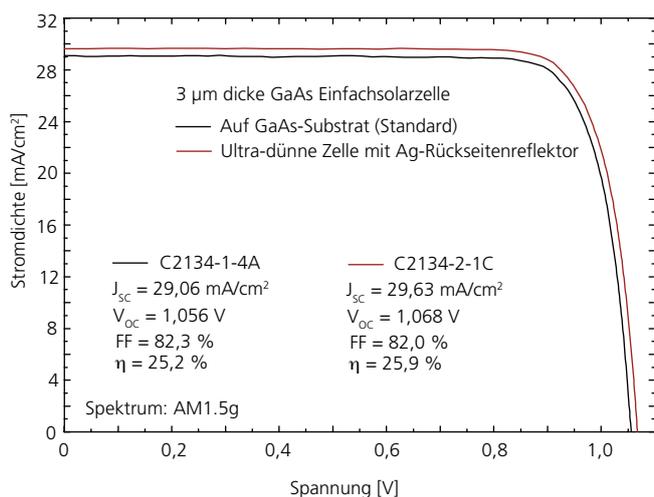
Simon Barke, Sandra Bau, Frank Dimroth, Matthias Grave, **Vera Klinger**, Daniel Neves Micha, Eduard Oliva, Manuela Scheer, Tom Tibbits, Katrin Wagner, Andreas Bett

Mehrfach-solarzellen erreichen die höchsten Effizienzen für die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrische Energie mit aktuell bis zu 46,0 %. Hierbei sind die III-V Halbleitersubstrate, die zum epitaktischen Wachstum verwendet werden, ein Kostenfaktor, obwohl sie nicht zur eigentlichen Funktion der Solarzelle beitragen. Daher ist es ökonomisch sinnvoll, die nur wenige Mikrometer dicke Solarzelle von ihrem Substrat zu trennen und dieses wiederzuverwenden.

Hierfür haben wir ein Verfahren entwickelt, bei dem eine sogenannte Opferschicht zwischen Solarzelle und Substrat gewachsen wird, die in einem nasschemischen Prozess selektiv geätzt werden kann. Dadurch trennen sich die ultra-dünne Solarzelle und das Substrat voneinander. Um die Solarzelle zu stabilisieren, wird vorher eine dünne Metallschicht aufgebracht. Hierdurch entsteht nach dem Ablösen des Substrats eine flexible und sehr leichte Solarzelle. Die Metallschicht hilft außerdem beim Trennen von Solarzelle und Substrat, da sie zu einem leichten Aufrollen der Solarzelle führt. So kann

1 *Trennen der ultra-dünne Solarzelle auf Metallfolie vom Wachstumssubstrat durch nasschemisches, selektives Ätzen.*

2 *Ultra-dünne Mehrfach-solarzellen prozessiert auf einer dünnen, flexiblen Metallfolie.*

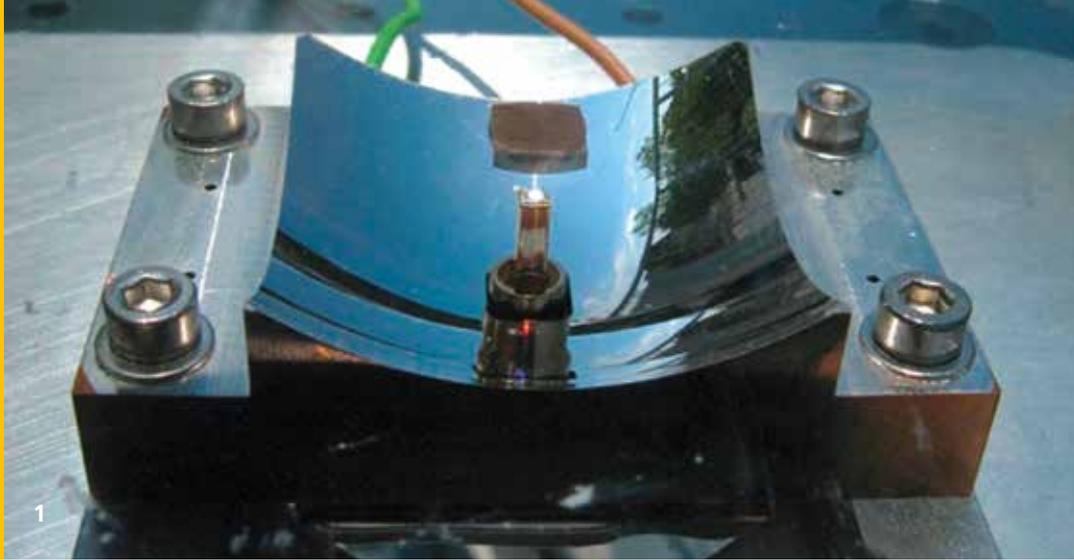


3 *Strom-Spannungskennlinie einer ultra-dünne GaAs-Einfachzelle auf Metallfolie mit Rückseitenreflektor und einem Wirkungsgrad von 25,9 %.*

der Ätzprozess ohne mechanische Hilfsmittel stattfinden. Das Wachstumssubstrat kann anschließend ohne teure Aufbereitungsprozesse für ein weiteres Solarzellenwachstum verwendet werden.

Mit diesem Verfahren wurden GaAs-Einfach-solarzellen mit einer Effizienz von 25,9 % unter dem AM1.5g-Spektrum hergestellt. Diese Solarzellen sowie Tandemsolarzellen können z. B. in niedrigkonzentrierenden Photovoltaiksystemen kostengünstig eingesetzt werden.

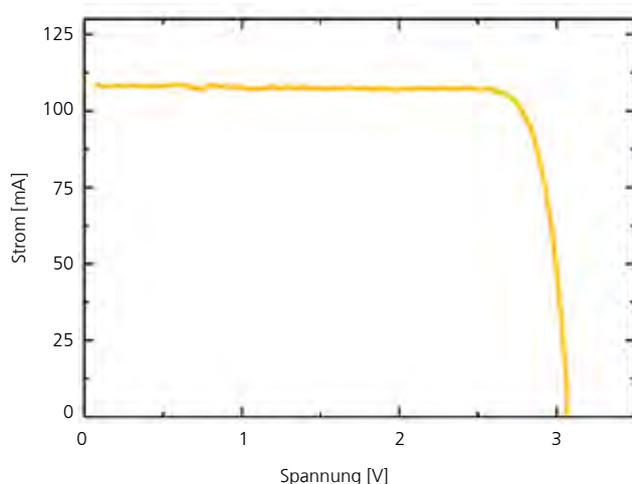
Die Arbeiten sind im Projekt »VirtualLab« angesiedelt, bei dem wir mit unseren Partnern am CEA-Leti und INES kooperieren.



CPV-MODUL-TECHNOLOGIE AUF BASIS DER CASSEGRAIN-OPTIK

In der Konzentrator-Photovoltaik wird das Sonnenlicht mit einer kostengünstigen Optik auf eine kleine Solarzelle fokussiert. Dazu können gekrümmte Spiegel eingesetzt werden, z. B. in der Cassegrain-Anordnung. Hier wird das Licht von einem konkav gekrümmten Spiegel (Primäroptik) über einen kleineren, konvex gekrümmten Spiegel (Sekundäroptik) auf die Solarzelle gelenkt. Damit werden geringe Modulbauhöhen erreicht. Mit diesem Konzept haben wir ein Prototypenmodul aufgebaut und evaluiert. Wir erreichen eine sehr gute optische Effizienz von ca. 80 % bei einer geometrischen Konzentration von 1000x. Durch eine erhöhte Position der Solarzelle können wir auf eine dritte, sogenannte Tertiäroptik verzichten.

Armin Bösch, Max Dreger, Thorsten Hornung, Arne Kisser, Tobias Schmid, **Maiko Wiesenfarth**, Andreas Bett



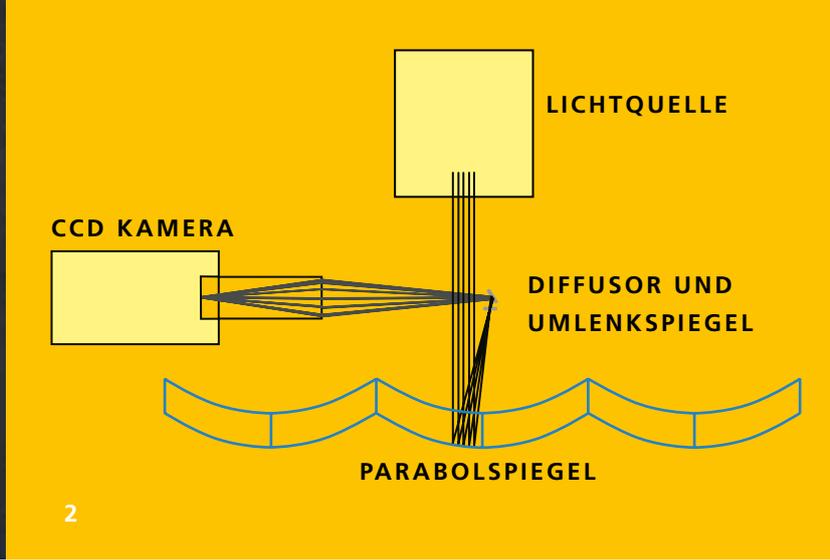
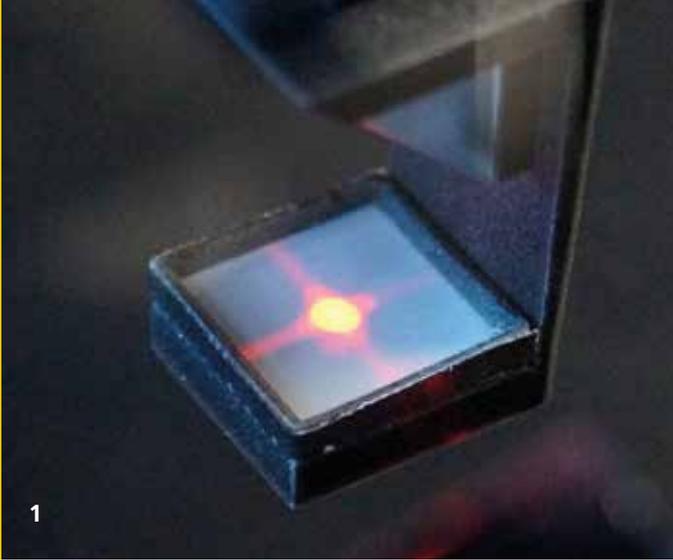
2 Außenmessung unseres Prototypen mit Cassegrain-Optik. Das Modul wurde über mehrere Monate im Außenteststand des Fraunhofer ISE vermessen. Bei der Messung am 01.08.2013 um 08:35 wurden z. B. 31,6 % der einfallenden Solarstrahlung in Strom gewandelt.

1 Mono-Konzentrator-PV-Modul bestehend aus einer Einheit einer Cassegrain-Spiegeloptik mit Solarzelle. Das Sonnenlicht wird mehr als 1000fach auf die 1 mm² große Solarzelle konzentriert. Die Solarzelle befindet sich erhöht zwischen der Primär- und Sekundäroptik.

In der Konzentrator-Photovoltaik entwickeln und analysieren wir verschiedene Modulkonzepte. Unsere neueste Entwicklung ist ein Modul mit Cassegrain-Spiegeloptik. Ein großer Vorteil dieser Optik ist, dass keine chromatische Aberration auftritt. Wir erwarten zudem eine geringere Temperaturabhängigkeit als bei Fresnellinsen. Die Aperturfläche des Moduls ist mit einer Kantenlänge der Primäroptik von 32 mm relativ klein. Dadurch kann eine Modulhöhe von weniger als 25 mm erreicht werden. Bei solch geringen Größen ist es möglich, die Solarzelle passiv zu kühlen, d. h. sie auf einem Wärmespreizer aufzubringen und über Konvektion und Strahlung die Wärme an die Umgebung abzugeben. Zusätzlich montieren wir die Solarzelle auf einem Turm. Das bedeutet, die Solarzelle befindet sich zwischen der Primär- und Sekundäroptik (Abb. 1). Wir erreichen so hohe Akzeptanzwinkel von 0,75°, d. h. auch bei einer Fehlausrichtung des Moduls von 0,75° gegenüber der Sonnenstrahlung werden noch 90 % der Leistung generiert.

Ein Schwerpunkt unseres Projekts war die Herstellung und Untersuchung der Konzentratoroptik. Neben einer diamantgedrehten Optik wurde eine Optik entwickelt, die in einem massenfertigungstauglichen Spritzgussprozess hergestellt wurde. Die Optiken haben wir in Labor- und Außenmessungen verglichen. Die Strom-Spannung-Kennlinie einer Außenmessung des Konzentratormoduls ist in Abb. 2 dargestellt. Es wurden Wirkungsgrade von 31,6 % erzielt. Mit kontinuierlichen Außenmessungen können wir nun das Langzeitverhalten untersuchen.

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



CHARAKTERISIERUNG VON PARABOLSPIEGELN FÜR KONZENTRATOR-PV

Die konzentrierende Photovoltaik (CPV) verwendet winzige Solarzellen zur Energieumwandlung und eine größere Fläche mit Optiken, um das Sonnenlicht zu sammeln und zu fokussieren. Dazu eignen sich Parabolspiegel, die im Gegensatz zu Linsen keine chromatische Aberration aufweisen. Die Verteilung des fokussierten Sonnenlichts auf der Solarzelle entscheidet mit über die Effizienz des Gesamtsystems. Wir bestimmen diese Verteilung an einem neu entwickelten Messplatz und verwenden sie zur Vorhersage des Systemverhaltens. Damit können wir die Geometrie der Parabolspiegel und deren Herstellungsprozesse optimieren sowie Qualitätskontrollen durchführen.

Thorsten Hornung, Peter Nitz, Tobias Schmid, Werner Platzer

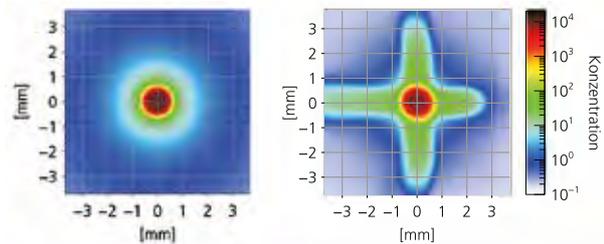
CPV-Systeme konzentrieren das direkte Sonnenlicht z. B. mit Parabolspiegeln auf kleine Solarzellen. Die optischen Eigenschaften der Spiegel charakterisieren wir mit unserem neu entwickelten Messplatz. Das Messsystem misst die optische Konzentration orts aufgelöst in der Brennebene des Parabolspiegels, wo sich in einem Konzentrator-Photovoltaiksystem die Solarzelle befinden würde. Die Messung ermöglicht damit direkt Rückschlüsse auf die räumliche Verteilung der Zellbestrahlung im realen System.

Da der Brennpunkt eines Parabolspiegels in dessen Eintrittsapertur liegt, würde ein dort platzierter Detektor im Messsystem das einfallende Licht blockieren. Deshalb haben wir dort einen kleinen Diffusor eingebaut, der über einen Umlenkspiegel mit Hilfe einer außerhalb der Eintrittsapertur montierten CCD-Kamera fotografiert wird (Abb. 2).

Die Unterschiede zweier Parabolspiegel, die mit unterschiedlichen Herstellungsprozessen gefertigt wurden, werden in den am Messplatz bestimmten Lichtverteilungen deutlich

1 Diffusor im Brennpunkt eines Parabolspiegels während einer Messung. Die sternförmige Lichtverteilung (in Falschfarben dargestellt) lässt auf Formabweichungen schließen, die die Leistung des CPV-Systems beeinträchtigen. Die eigentliche Messung erfolgt durch die Messkamera über einen Umlenkspiegel, der von der Seite als graues Dreieck oben im Bild zu sehen ist.

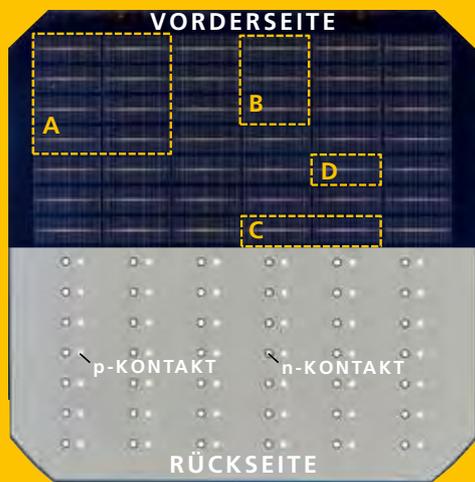
2 Schematischer Aufbau des Messplatzes. Im Fokus des Parabolspiegels befindet sich ein Diffusor, der über einen Umlenkspiegel fotografiert wird. Die einzelnen Spiegel können mit motorisierten Achsen unter der Lichtquelle positioniert werden.



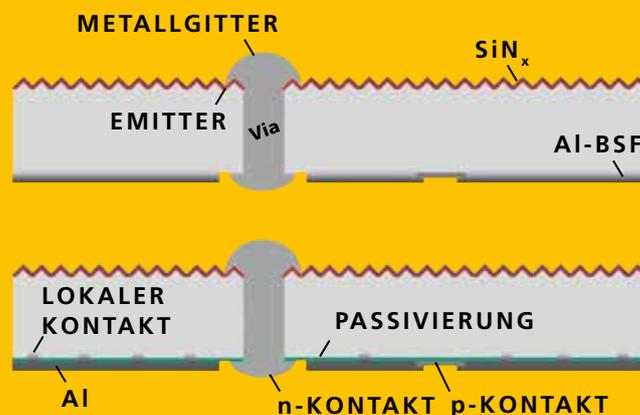
3 Gemessene Strahlungskonzentrationen im Brennpunkt zweier Parabolspiegel. Der Spiegel, der die linke Konzentrationsverteilung erzeugt, besitzt eine sehr hohe Formtreue, während die sternförmige Lichtverteilung im rechten Bild durch herstellbedingte, minimale Formabweichungen des dort untersuchten Spiegels entsteht.

sichtbar. Ein Spiegel bündelt das Licht sehr gut in einem Punkt (Abb. 3, links). Beim anderen Spiegel zeigt die Lichtverteilung eine sternförmige Verteilung im Fokus (Abb. 3, rechts). Dies lässt auf Formfehler während der Produktion schließen. Die Messergebnisse geben Aufschluss über den Einfluss dieser Formabweichungen auf die Leistung des CPV-Systems und liefern wichtige Erkenntnisse zur weiteren Verbesserung des optischen Konzentratorsystems.

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



1

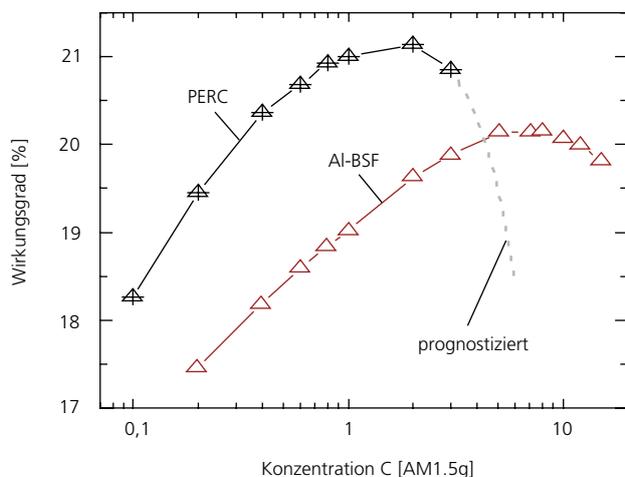


2

ALL-PURPOSE MWT-KONZEPT FÜR GRÖSSENVARIABLE SOLARZELLEN

Neben dem konventionellen Einsatz von Si-Solarzellen in einem Flachmodul gibt es Anwendungen, die im besonderen Maß für niedrige und besonders hohe eingestrahelte Leistungen optimiert sind. Dieser Einsatz zeichnet sich dadurch aus, dass die verwendeten Solarzellen entweder sehr geringe oder besonders hohe Stromdichten effizient verarbeiten müssen. Zudem setzen solche Anwendungen variable Größen und ein flexibles Strom-Spannungs-Verhältnis des fertigen Produkts voraus. In diesem Zusammenhang haben wir das All-Purpose-Metal-Wrap-Through (AP-MWT)-Konzept entwickelt. Spitzenwirkungsgrade von 20,2 % bei einer Einstrahlung von 1 W/cm² (C = 10), 21,0 % bei C = 1 und 18,3 % bei C = 0,1 werden erreicht.

Daniel Biro, Florian Clement, Matthieu Ebert, Ulrich Eitner, Tobias Fellmeth, Ingrid Hädrich, Ralf Preu

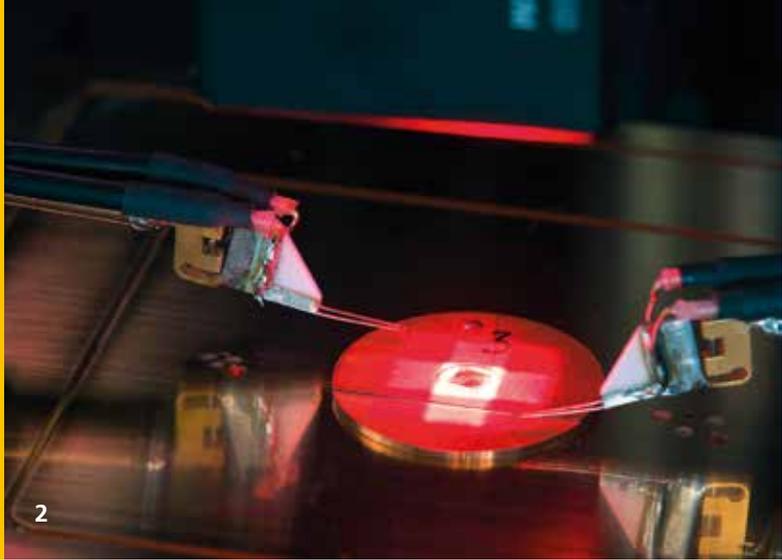


3 Wirkungsgrad in Abhängigkeit der Einstrahlung für die zwei verfolgten Technologierouten der AP-MWT-Solarzelle. Die Konzentration bezieht sich dabei auf eine Referenzleistung von 1000 W/m², was einer Sonne (C = 1) entspricht.

- 1 Vorder- und Rückseite der AP-MWT-Solarzellen im Si-Wafer. Beispiele A–D entsprechen möglichen finalen Solarzellendesigns nach Vereinzelung.
- 2 Schematischer Querschnitt durch die AP-MWT-Solarzelle optimiert für hohe (Al-BSF, oben) und niedrige (PERC, unten) Einstrahlungsbereiche.

Das AP-MWT-Konzept zeichnet sich durch ein Elementarzellen-design aus, das Zellgrößen von minimal 2,25 cm² bis maximal 189 cm² erlaubt (Abb. 1). Auf einem Si-Wafer befinden sich 84 Elementarzellen, die rückseitig je einen externen Kontakt für die negative und positive Polarität haben. Mit diesem Aufbau minimieren wir Abschattungsverluste durch das vorderseitige Metallgitter und maximieren die Flexibilität durch eine rein rückseitige Verschaltung. Dadurch ist es möglich, das Strom-Spannungsverhältnis durch Änderungen bei Anzahl und Größe der zu verschaltenden Zellen anzupassen. Wir verwenden ausschließlich industriennahe Prozesse um AP-MWT-Solarzellen herzustellen. Dabei kommen abhängig von der späteren Anwendung Technologien zum Einsatz, die besonders für die jeweilige eingestrahelte Intensität geeignet sind. Der obere Querschnitt in Abb. 2 zeigt eine rückseitig, flächig kontaktierte Solarzelle (Al-BSF), die besonders für den Einsatz bei hoher Einstrahlung geeignet ist. Auf dem unteren Querschnitt ist eine rückseitig passivierte und lokal kontaktierte Solarzelle (PERC) zu sehen, die insbesondere bei einer Einstrahlung von einer bis zu einer zehntel Sonne zum Einsatz kommt.

Das im Fraunhofer ISE angesiedelte PV-TEC ermöglicht neben der Herstellung von Kleinserien bis zu 1000 Wafern das Vereinzeln aus dem Wafer, die I-V-Messung bei der gewünschten Einstrahlung und eine Sortierung nach Leistungsklassen. Darüber hinaus bieten wir FuE-Leistungen zu Verbindungstechnologie, SMT-Prozessen, Einkapselung und theoretischer Modellierung sowie elektrischer Charakterisierung von Modulen.



MONOCHROMATISCHE CHARAKTERISIERUNG VON LASERLEISTUNGSZELLEN

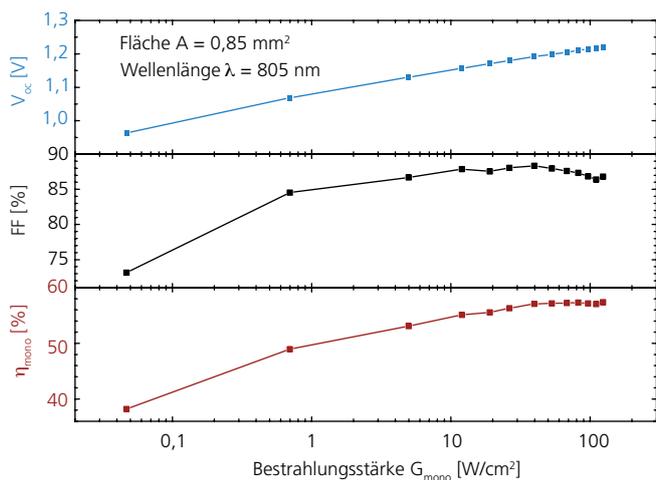
III-V Photovoltaikzellen werden neben solaren Anwendungen auch zur optischen Leistungsübertragung verwendet. Dabei wird Energie in Form von monochromatischem Licht über eine optische Faser übertragen. Die Photovoltaikzelle wandelt das Licht direkt am Verbraucher zurück in elektrische Leistung. Zur anwendungsnahen Charakterisierung solcher Laserleistungszellen ist – im Gegensatz zur Vermessung von Solarzellen unter einem möglichst sonnenähnlichen Spektrum – monochromatische Bestrahlung erforderlich. Daher haben wir am Fraunhofer ISE einen laserbasierten Messplatz zur kalibrierten Vermessung von Photovoltaikzellen unter monochromatischem Licht aufgebaut.

César Garza, Henning Helmers, Markus Mundus, Kasimir Reichmuth, Gerald Siefer, Daniel Vahle, Andreas Bett

Mittels optischer Leistungsübertragung können elektrische Verbraucher (z. B. Sensoren und Aktoren) in Umgebungen, in denen konventionelle Kupferkabel problematisch sind, elektrisch versorgt werden. Beispiele sind Hochspannungsumgebungen oder hohe Magnetfelder, in denen galvanische Trennung erforderlich ist, die Vermeidung von elektromagnetischer Störung, rotierende Systeme oder drahtlose Energieübertragung. Genutzt wird diese Technologie z. B. in der Überwachung von Windkraftanlagen, in Flugzeugtanks, bei Hochspannungsleitungen, in smarten Implantaten oder auch für die Überwachung von passiven optischen Netzwerken. Durch die Abstimmung von Halbleitermaterial und Laserwellenlänge sind sehr hohe Wirkungsgrade möglich. Mit GaAs-basierten Zellen haben wir bei einer Laserwellenlänge von 805 nm einen Wirkungsgrad von 57,4 % bei einer Bestrahlungsstärke von 124,0 W/cm² erreicht.

Die präzise und reproduzierbare Charakterisierung von Photovoltaikzellen unter monochromatischem Licht, unabhängig

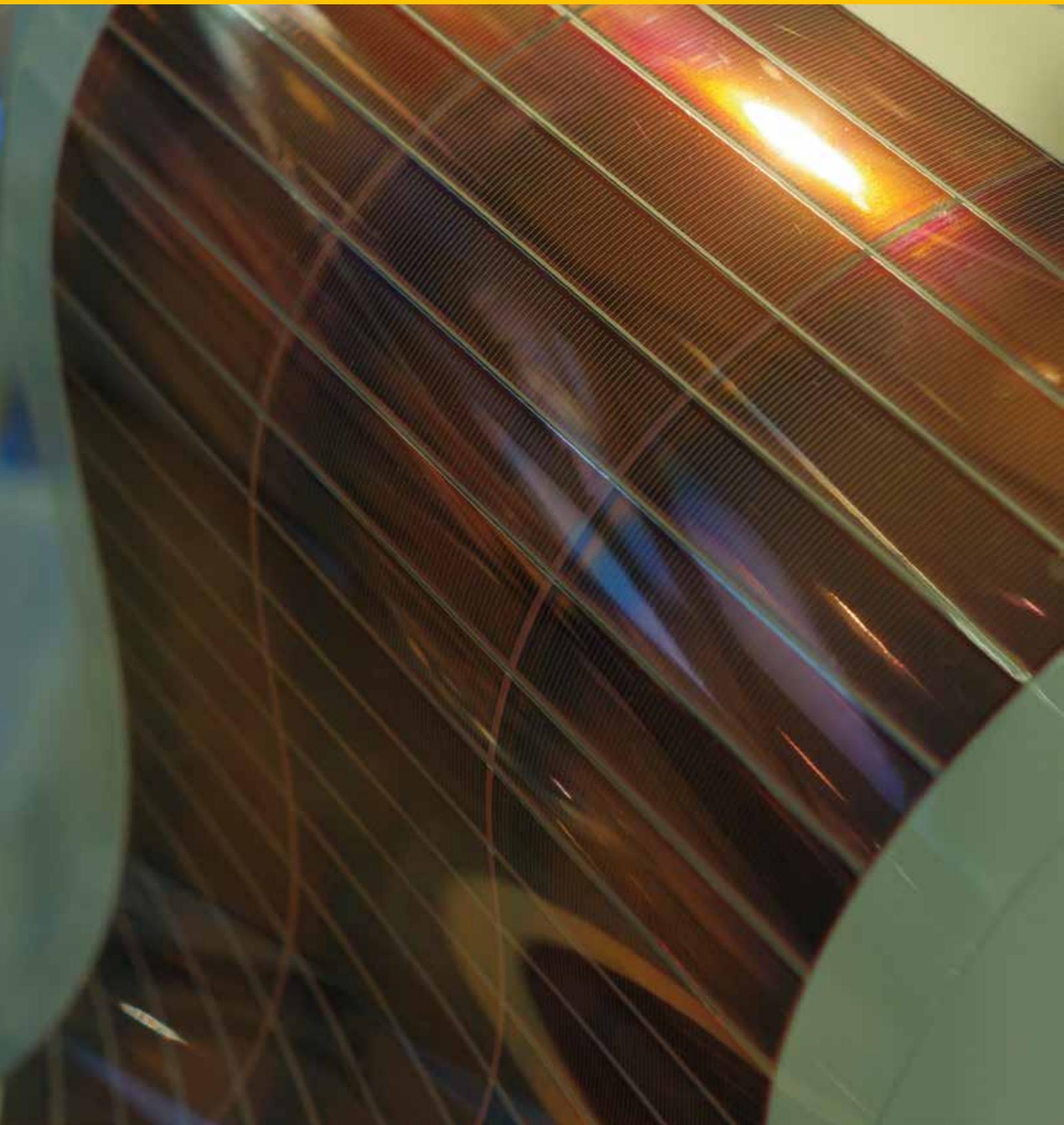
- 1 Messplatz zur Strom-Spannungs-Messung von Photovoltaikzellen unter monochromatischer Bestrahlung.
- 2 Auf Kupfersubstrat montierte Photovoltaikzelle im homogenisierten Strahlprofil. Dieses gewährleistet eine vergleichbare sowie Design- und Justage-unabhängige Charakterisierung.



- 3 Leerlaufspannung V_{oc} , Füllfaktor FF und Wirkungsgrad η_{mono} einer GaAs-basierten Laserleistungszelle in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke G bei monochromatischer Bestrahlung mit 805 nm.

vom Zeldesign, stellt eine Herausforderung dar. Bei direkter Laserbestrahlung der Testzelle beeinflusst das spezifisch vorliegende, inhomogene Strahlprofil die Messung. Zudem muss die tatsächliche Laserleistung indirekt bestimmt werden. Bei kontinuierlicher Bestrahlung erwärmt sich die Testzelle während der Messung. Der von uns aufgebaute Messplatz zur kalibrierten Vermessung umgeht diese Einschränkungen. Dazu ist im Strahlverlauf eine homogenisierende Optik eingebracht. Zur Überwachung der Intensität wird ein Teil des Strahls auf eine Monitorzelle ausgekoppelt. Zudem wird die elektrische Messung innerhalb eines Millisekunden-Laserpulses durchgeführt, so dass eine Erwärmung der Zelle vermieden wird.

FARBSTOFF-, ORGANISCHE UND NEUARTIGE SOLARZELLEN



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

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

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

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

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

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

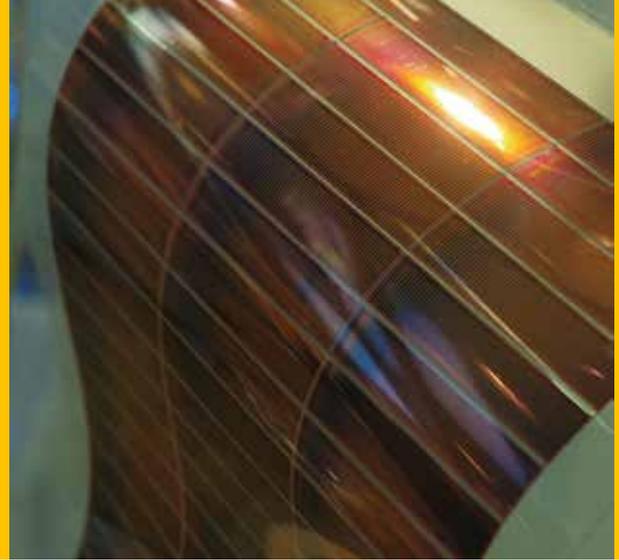
Für die bessere Ausnutzung des Sonnenspektrums (Reduzierung der Thermalisierungsverluste) entwickeln wir auch Silicium-basierte Tandemsolarzellen. Dabei stehen neben der Prozessanpassung der Si-Basiszelle und der Entwicklung von Tunnelkontakten vor allem neue Silicium-Nanokristallmaterialien mit einstellbaren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

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	45
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	31
Zeitschriften- und Buchbeiträge	33
Vorträge und Konferenzbeiträge	18
Neu erteilte Patente	1

www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/25



ITO-freies organisches Solarmodul mit einer Größe von 40 cm x 25 cm.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Uli Würfel

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

Farbstoffsolarzellen

Dr. Andreas Hinsch

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

Organische Solarzellen

Dr. Uli Würfel

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

Photonenmanagement

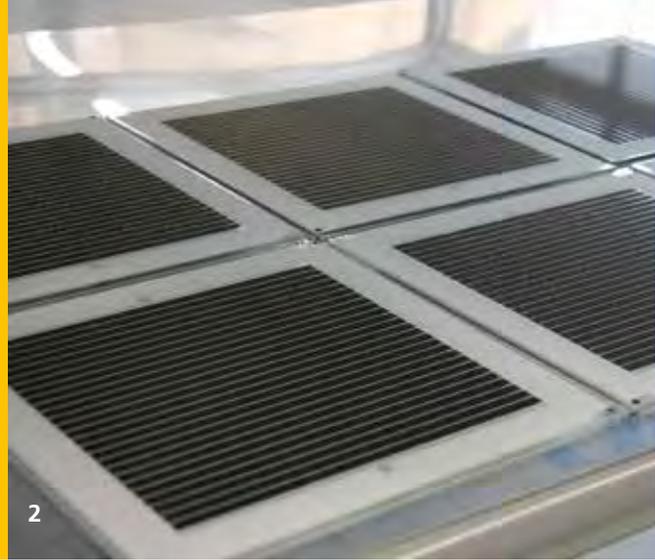
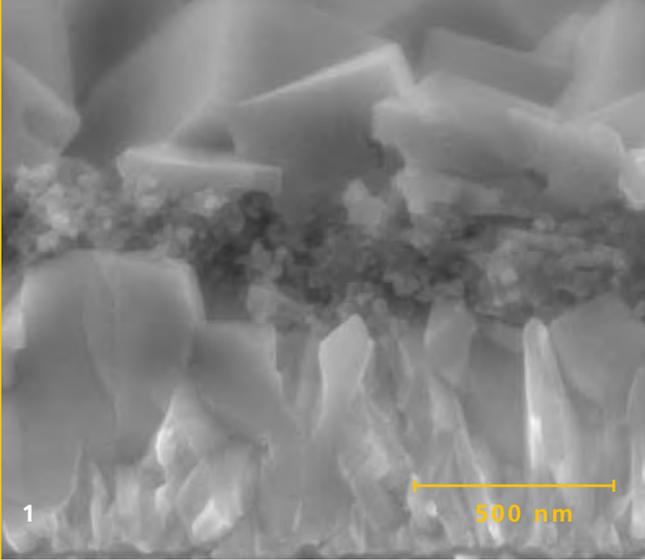
Dr. Jan Christoph Goldschmidt

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

**Tandemsolarzellen auf
kristallinem Silicium**

Dr. Stefan Janz

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



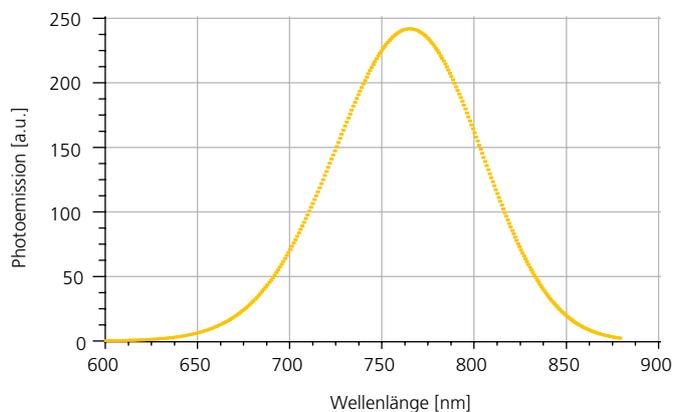
IN SITU HERSTELLUNG VON PEROWSKIT-SOLARMODULEN

Beim aktuellen FuE-Thema Perowskit-Solarzellen wurde 2014 von verschiedenen Forschungsgruppen im Labor ein solarer Wirkungsgrad von bis zu 20 % gemeldet. Am Fraunhofer ISE wird untersucht, wie das Prinzip der Perowskit-Solarzellen durch ein neu entwickeltes in situ Beschichtungsverfahren aufskaliert werden kann. Hierbei greifen wir auf unsere langjährige Erfahrung bei der Versiegelung von großflächigen Farbstoffsolarmodulen zurück. Die Solarzellen werden im Inneren eines mit Glasloten hermetisch versiegelten Moduls hergestellt. Vakuumprozesse und eine zusätzliche Laminierung entfallen. Künftig könnte dieses kosteneffiziente Prinzip auch bei anderen photovoltaischen Materialkonzepten angewendet werden.

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

Aufgrund des Salzcharakters der photovoltaisch sehr effizienten Metall-Halogenidperowskite $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{MX}_3$ müssen Solarzellen aus diesen Materialien sehr gut verkapselt werden. Dies ist mit dem von uns entwickelten in situ Herstellungsverfahren möglich. Die photoaktiven Materialien werden aus der Lösung innerhalb der Zellen in nano-porösen Trägerschichten aufgenommen und durch die anschließenden Trocknungsschritte abgeschieden. Wie unsere Arbeiten zeigen, ist die Kristallbildung innerhalb weniger Sekunden möglich, wenn zuerst in situ das Metallsalz MX_2 gleichmäßig in der Elektroden-schicht abgeschieden wird und dann eine Umkristallisierung durch Einbringen der zweiten gelösten Perowskit-Komponente $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{X}$ bewerkstelligt wird. Wie Abb. 1 zeigt, konnten Perowskit-Kristalle als geschlossene photoaktive Schicht ausgebildet und durch Photolumineszenzmessungen (Abb. 3) nachgewiesen werden. Ein wichtiger Schritt hin zu effizienten in situ Solarzellen ist die Optimierung der porösen, leitfähigen Kontaktierungsschicht auf der Rückseite. Dafür wurden

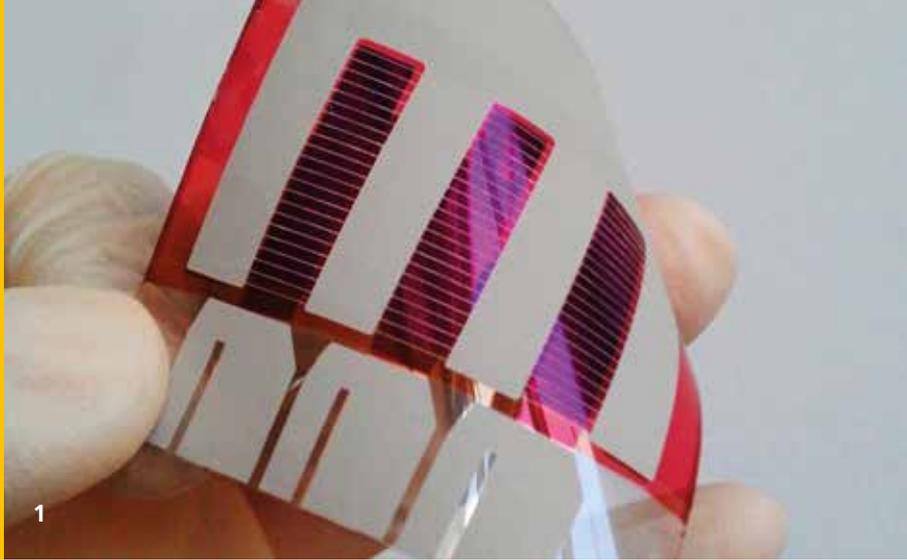
- 1 REM-Aufnahme des Querschnitts einer in situ hergestellten Photoelektrode für Perowskit-Solarzellen auf Glas. Zu erkennen sind in der Reihenfolge von unten die Kristalle des transparent leitfähigen Zinnoxids, die nano-poröse, elektronenselektive Schicht aus Titandioxid sowie die aus der Lösung innerhalb der Solarzelle abgeschiedenen Kristalle des Perowskits.
- 2 Herstellung erster Elektrodensubstrate mittels Siebdruck für die Neuentwicklung von 20 cm x 20 cm Perowskit-Solarmodulen nach dem in situ Verfahren des Fraunhofer ISE.



- 3 Der aktuell in Solarzellen verwendete Perowskit ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$) zeichnet sich durch eine starke Photolumineszenz im Nahen Infrarot aus. Das zum Nachweis der in den in situ Zellen abgeschiedenen Perowskit-Kristallen gemessene Photolumineszenzspektrum weist ein charakteristisches Emissionsmaximum bei 755 nm auf.

graphithaltige Siebdruckpasten hergestellt und getestet. Zudem haben wir ein Modullayout mit größerer Fläche entwickelt und erste Elektrodensubstrate (Abb. 2) mit hoher Genauigkeit bedruckt.

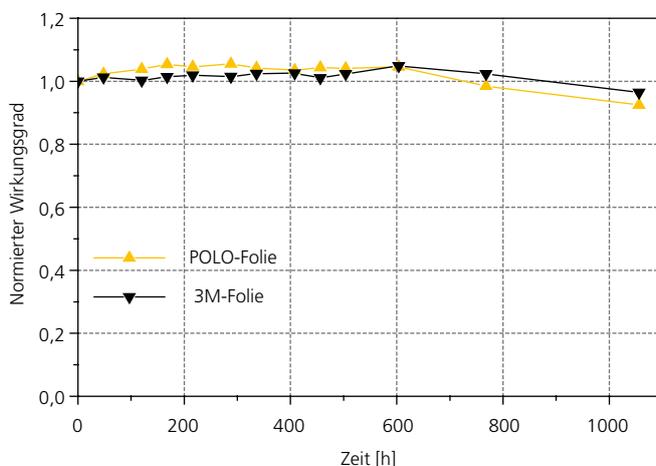
Die Projektarbeiten zusammen mit Partnern aus Universitäten und Industrie dauern an. Die grundlegenden Arbeiten wurden im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts »GLOBASOL« durchgeführt.



LEBENSDAUERUNTERSUCHUNGEN AN ORGANISCHEN SOLARZELLEN

In den vergangenen Jahren wurde der Wirkungsgrad organischer Solarzellen kontinuierlich erhöht. Er erreicht jetzt Werte, die eine kommerzielle Nutzung dieser Technologie realistisch erscheinen lassen. Hierfür ist es wichtig, das Alterungsverhalten organischer Solarzellen zu verstehen. Daraus können dann Lebensdauerprognosen erstellt werden. Während unverkapselte Solarzellen an Luft und unter Beleuchtung schnell degradieren, weisen versiegelte Zellen eine deutlich höhere Stabilität auf. Unsere Solarzellen verloren bei Alterung unter feuchter Hitze nach 1000 Stunden nur 3–10 % des anfänglichen Wirkungsgrads. Sie bestanden damit einen der standardisierten Tests für Dünnschichtsolarzellen.

Ines Dürr, Markus Kohlstädt, Subarna Sapkota, Annika Spies, Uli Würfel, Birger Zimmermann, Stefan Glunz



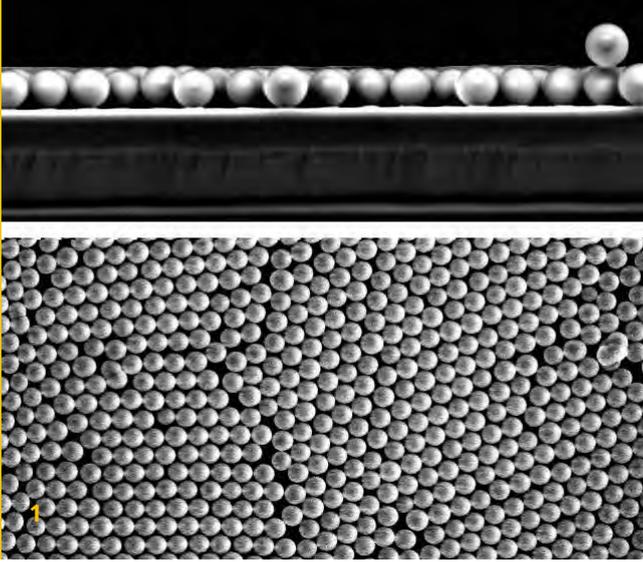
2 Evolution der auf die Startwerte normierten Wirkungsgrade von flexiblen Solarzellen während der Alterung unter feuchter Hitze. Die Solarzellen wurden mit Barrierefolien der Fraunhofer-Allianz Polymere Oberflächen (POLO) oder der Firma 3M verkapselt.

1 Flexible, unverkapselte organische Solarzellen auf einem Folien-substrat. Die aktive Fläche der Zellen beträgt $1,1 \text{ cm}^2$.

Um organische Solarzellen kommerzialisieren zu können, müssen diese über eine der Anwendung angepasste Lebensdauer verfügen. Diese reicht von ca. 3–5 Jahren für Anwendungen im Bereich mobiler Elektronik bis zu einer Garantie über 20 Jahre bei gebäudeintegrierter PV oder PV im Freifeld. Die Anwendungsfelder bestimmen dabei die Stressszenarien, unter denen die Solarzellen in unseren Labors getestet werden.

Die Degradation verkapselter organischer Solarzellen wird am Fraunhofer ISE unter thermischer Belastung bei 85 °C , kontinuierlicher UV-Beleuchtung, kontinuierlicher Beleuchtung mit einer Bestrahlungsstärke von 1000 W/m^2 , feuchter Hitze (85 °C , 85 % Luftfeuchtigkeit) und unter realen Bedingungen im Freien (Außenbewitterung) getestet. Wenn Solarzellen verkapselt werden, verlieren sie auch bei kontinuierlicher Beleuchtung nach mehr als 12 000 Stunden weniger als 10 % ihres anfänglichen Wirkungsgrads. Dies entspricht in etwa einer Strahlungsdosis, die Solarzellen in Mitteleuropa innerhalb von 12 Jahren im Freien erfahren. Eine Lebensdauer von mehr als 20 Jahren ist so vorstellbar. Unter thermischer Belastung verlieren die Solarzellen auch nach 10 000 Stunden praktisch keine Leistung. Darüber hinaus weisen vollständig flexible Solarzellen nach 1000 Stunden Alterung unter feuchter Hitze eine Degradation von weniger als $5\text{--}10 \text{ %}$ auf (Abb. 2). Sie bestanden so Standard-Testkriterien für Dünnschichtsolar-module nach IEC 61646.

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



PHOTONENMANAGEMENT FÜR EFFIZIENTE UND KOSTENGÜNSTIGE SOLARZELLEN

Mit Photonmanagement kann der Weg und die spektrale Zusammensetzung des Lichts günstig beeinflusst werden. Am Fraunhofer ISE setzen wir Photonmanagement ein, um mehr Licht in Solarzellen zu absorbieren und durch spektrale Hochkonversion einen größeren Spektralbereich für die Solarzellen nutzbar zu machen. Mit neuartigen optischen Nanostrukturen realisieren wir Solarzellen mit hoher Absorption und geringeren Oberflächenrekombinationsverlusten und steigern so die Effizienz der Hochkonversion.

Alexander Bett, Benedikt Bläsi, Johannes Eisenlohr, Stefan Fischer, Benjamin Fröhlich, **Jan Christoph Goldschmidt**, Johannes Gutmann, Hubert Hauser, Martin Hermle, Barbara Herter, Clarissa Hofmann, Oliver Höhn, Benjamin Lee, Nico Tucher, Sebastian Wolf, Stefan Glunz

Gitterstrukturen an der Rückseite von Siliciumsolarzellen können schwach absorbiertes Licht umlenken und so für einen verbesserten Lichteinfang sorgen. Solche Gitterstrukturen können kostengünstig durch Imprint-Prozesse oder durch selbstorganisierte Prozesse (Abb. 1) hergestellt werden. Am Fraunhofer ISE erstellen wir Strukturen, die durch eine Passivierungsschicht von dem elektrisch aktiven Teil der Solarzelle getrennt sind. Dadurch wird die Oberflächenrekombination reduziert und sehr hohe Spannungen (> 700 mV) werden möglich. Damit kann prinzipiell auf eine aufwendige Texturierung der Vorderseite verzichtet und so Kosten gespart werden.

1 *Hexagonale Kugeligitter für den Lichteinfang in Solarzellen werden in einem selbstorganisierten Prozess aus Siliciumdioxidkugeln hergestellt. Durch Rotationsbeschichtung wird eine Monolage der Kugeln auf einen passivierten Siliciumwafer abgeschieden (oben), durch Selbstorganisation bildet sich eine hexagonale Ordnung aus (unten). Anschließend werden die Zwischenräume mit einem Material mit hohem Brechungsindex aufgefüllt.*

Hochkonversion bezeichnet die Umwandlung niederenergetischer, nicht nutzbarer Photonen in höherenergetische, nutzbare Photonen. Zusammen mit Partnern der Universität Pisa konnten wir mit einem $\text{BaY}_2\text{F}_8:\text{Er}^{3+}$ Hochkonverter den Strom einer bifazialen Siliciumsolarzelle um 0,5 % relativ steigern. Dieser neue Rekordwert ist um einen Faktor 40 besser als der ca. vier Jahre alte Bestwert. Für eine weitere Verstärkung der Hochkonversion untersuchen wir photonische Nanostrukturen, die einfallendes Licht auf den Hochkonverter konzentrieren und die Emission von Licht günstig beeinflussen. Z. B. durch Gitterstrukturen lässt sich die Hochkonversionslumineszenz mindestens um einen Faktor 3 steigern.

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

PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND KRAFTWERKE



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

Das Photovoltaik Modul-Technologiecenter (Module-TEC) bietet eine große Bandbreite an Prozess- und Analyseplattformen für Aufbau- und Verbindungstechnik, insbesondere zur Materialerprobung sowie Produkt- und Prozessentwicklung. Über Messungen und Simulationen analysieren wir elektrische, optische und mechanische Effekte von der Zelle bis zum Modul. Unsere Wissenschaftler führen Entwicklungen aus dem Laborstadium weiter zu aussagekräftigen Modulstückzahlen und -formaten.

Lebensdauer und Degradationsverhalten der Komponenten sind entscheidend für die Rentabilität eines PV-Kraftwerks. Das Verständnis und die Definition der Alterungsursachen ist Aufgabe der Umweltsimulation. Wir beobachten das Verhalten von Prüflingen, z. B. PV-Modulen, in verschiedenen Klimaten genauestens mittels von uns entwickelter Monitoring-Ausrüstung. Den Einfluss der klimatischen Belastungen untersuchen wir zudem analytisch, unter möglichst zerstörungsfreien Testbedingungen (z. B. durch Raman- und FTIR-Spektroskopie), um Alterungsmechanismen zu verstehen und frühzeitig zu erkennen. Auf Basis der Umwelt- und Degradationsanalyse entwickeln wir Simulationsmodelle und beschleunigte Prüfverfahren zur Untersuchung des Alterungsverhaltens, besonders zur Qualifizierung neuer Materialien und Komponenten. Für die Prüfung stehen neben den Einrichtungen unseres seit 2006 akkreditierten TestLab PV Modules auch spezielle Prüfanlagen – zum Teil aus eigener Entwicklung – zur Verfügung, mit denen wir auch kombinierte und verstärkte Belastungen untersuchen bzw. simulieren können.

Mit den vier Phasen des Fraunhofer ISE Qualitätszirkels – Ertragsgutachten, Stichprobenmessungen an Modulen, Anlagenprüfung und Performance Check – gewährleisten wir eine umfassende Qualitätssicherung von PV-Modulen und -Kraftwerken. Neben einer guten Planung und dem Einsatz hochwertiger Komponenten ist sie eine entscheidende Voraussetzung für den effizienten Betrieb sowie den Ertrag

einer PV-Anlage und kann so die »bankability« eines vorgelegten Konzepts erhöhen. In der Planungsphase einer PV-Anlage greifen wir auf aussagekräftige Strahlungs- und Wetterdaten zurück und simulieren exakt den Aufbau der Anlage. Unser CallLab PV Modules bietet zur präzisen Messung und Charakterisierung von PV-Modulen verschiedene Standard- und Präzisionsmessungen für Forschung, Entwicklung und Produktion. Das CallLab PV Modules zählt mit einer Messunsicherheit von weniger als 1,6 % bei kristallinen Modulen zu den führenden Labors weltweit. Ist eine PV-Anlage in Betrieb, gibt eine detaillierte Vor-Ort-Analyse Aufschluss über die momentane Qualität und die tatsächliche Performance Ratio. Unser kundenspezifisches PV-Monitoring bietet eine präzise Analyse der Effizienz von Systemen und Komponenten über die komplette Betriebsdauer einer PV-Anlage hinweg.

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

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	115
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	84
Zeitschriften- und Buchbeiträge	15
Vorträge und Konferenzbeiträge	21
Neu erteilte Patente	2

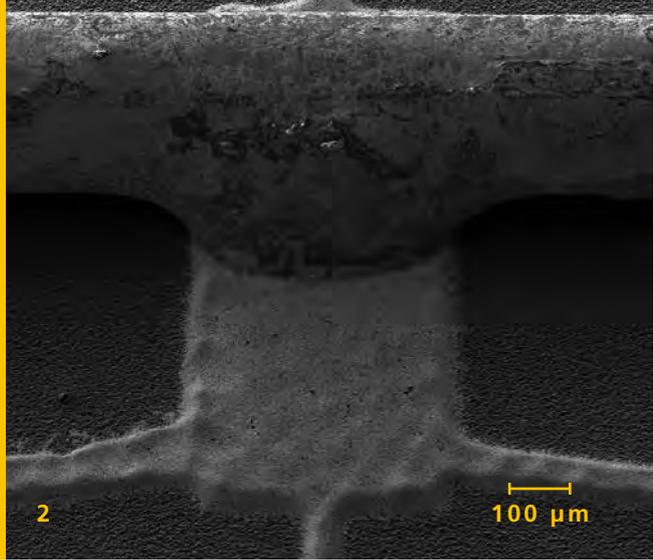
www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/30



Zerstörungsfreie Materialanalyse für PV-Module mittels Raman-Spektroskopie. Mit dieser Technologie wird das Degradationsverhalten des polymeren Verkapselungsmaterials von PV-Modulen orts aufgelöst bestimmt. Damit können Degradationsindikatoren für Lebensdauermodelle einfach gemessen und Alterungsmechanismen bestimmt werden.

ANSPRECHPARTNER

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



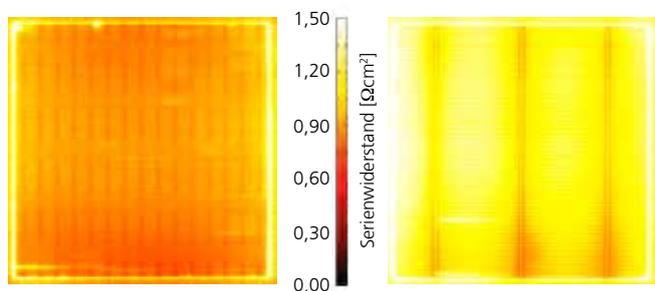
DRAHTVERSCHALTUNG VON SOLARZELLEN – EFFIZIENT UND ZUVERLÄSSIG

Zur Verschaltung kristalliner Solarzellen werden heute Flachdrahtverbinder auf die drei Busbars der Zelle gelötet. Eine Alternative ist die Verschaltung mit dünnen Runddrähten. Dadurch ist eine homogenere Stromverteilung auf der Zelle, ein geringerer Silberverbrauch für die Vorderseitenmetallisierung sowie eine höhere Modulleistung durch verbesserte Lichtreflexion möglich. Darüber hinaus haben die vielen dünnen Drähte auf der Zelle ein homogenes, ästhetisch ansprechendes Erscheinungsbild. Unsere Messungen zeigen, dass Solarmodule mit dieser Drahtverschaltungstechnologie unter beschleunigter Alterung eine sehr gute Zuverlässigkeit und potenziell höhere Wirkungsgrade als Standardmodule haben.

Ines Dürr, Ulrich Eitner, Torsten Geipel, **Li Carlos Rendler**, Marco Tranitz, Johann Walter, Harry Wirth

In Zusammenarbeit mit dem Anlagenhersteller SCHMID entwickeln wir eine neue Generation von Stringern. Dabei werden die lotummantelten Drähte auf die Solarzelle weichgelötet. Die Vorteile des Konzepts liegen in der einfachen Nachrüstung in bestehende Modulproduktionen und in der Verwendung von etablierten zinnhaltigen Standardloten und -prozessen. Bislang konnte eine Silbereinsparung von 50 % durch die Anpassung der vorderseitigen Metallisierung und durch die Direktkontaktierung von rückseitigem Aluminium erreicht werden. Eine weitere Reduktion wird derzeit evaluiert. Eine Schlüsselrolle spielt dabei die detaillierte Charakterisierung von Fugestelle und Metallisierung. So konnte die PL-R₃-Methode für Solarzellenverschaltung weiterentwickelt und die um 23 % geringeren seriellen Widerstandsverluste ortsaufgelöst quantifiziert werden. Des Weiteren ermöglicht eine spezielle Präparationsmethodik die mikrostrukturelle Analyse der Fugestellen und die Adhäsionsprüfung zur Zelle auch nach beschleunigten Alterungstests. Ein weiterer Schwer-

- 1 Solarzelle mit Drahtverschaltung.
- 2 Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Solarzelloberfläche. Zu erkennen sind die Metallisierung auf der Solarzelloberfläche, ein Verbinderdraht und die sich nach dem Lötprozess ausgebildete Fugestelle.



- 3 Mit Photolumineszenzmessung aufgenommene, ortsaufgelöste Darstellung des Serienwiderstands einer kontaktierten Solarzelle (links: Solarzelle mit Drahtverschaltung, rechts: 3-Busbar Solarzelle).

punkt liegt auf der thermomechanischen Charakterisierung des Drahts. Der Fügeprozess konnte so stetig verbessert werden. Die Abzugkräfte liegen deutlich oberhalb 1 N/mm Lötbahnbreite. Auch kritische Zuverlässigkeitstests aus der IEC 61215 zur Überprüfung der Langzeitstabilität wurden bestanden. Es zeigte sich, dass die Lötstellen eine sehr gute mechanische Festigkeit aufweisen und den Belastungen der Solarmodulprüfung standhalten.

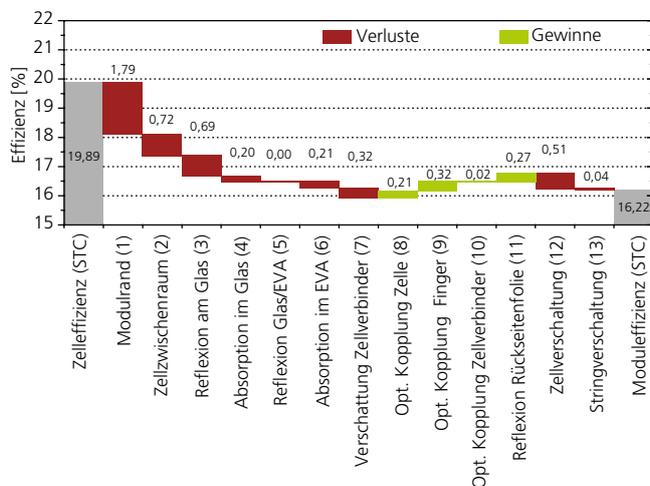
Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert und in Kooperation mit der Gebr. SCHMID GmbH bearbeitet.



MODULINTEGRATION VON SOLARZELLEN: GEWINNE UND VERLUSTE

In kristallinen Solarmodulen können Verschaltung und Einbettung der Solarzellen zu Leistungsverlusten in einer Größenordnung von 10 bis 20 Watt führen. Ein genaues Verständnis der Gewinn- und Verlustmechanismen ist deshalb für die Senkung der spezifischen Modulkosten (€/W_p) entscheidend. Wir haben eine Methodik entwickelt, die den Einfluss der verwendeten Modulmaterialien und des Moduldesigns auf die Gesamtleistung quantitativ und differenziert darstellt. Grundlage ist eine Reihe von aufeinander abgestimmten optischen und elektrischen Messmethoden. Mit dem Kalkulationsmodell kann die Interaktion der optischen und elektrischen Effekte im Modul analysiert und eine zielgerichtete Leistungs- und Effizienzoptimierung durchgeführt werden.

Ulrich Eitner, Ingrid Hädrich, Martin Wiese, Harry Wirth



2 Gewinn- und Verlustmechanismen beispielhaft berechnet für ein kommerzielles Solarmodul mit 60 monokristallinen pseudo-square Solarzellen.

1 TopMod-Modul mit optimiertem CTM (Cell to Module)-Verlust.

In unserem Modell unterscheiden wir zwischen geometrischen, optischen und elektrischen Effekten. Abb. 2 stellt die miteinander wechselwirkenden Effekte übersichtlich dar. Inaktive Modulfläche außerhalb der Zellfläche bewirkt geometrisch bedingte Wirkungsgradeinbußen. Optische Verluste entstehen durch Reflexion und Absorption in den Deckschichten, optische Gewinne durch reflexionsmindernde Veränderung des Brechungsindexübergangs an der Zelloberfläche und indirekte Lichtreflexionen an Zellmetallisierung, Zellverbindern und zwischen den Zellen. Für elektrische Verluste sind ohmsche Widerstände vor allem in den Zell- und Querverbindern verantwortlich.

Wir haben Front- und Rückseitenmaterialien variiert und die Auswirkungen auf die Modulleistung bestimmt. Es zeigte sich, dass die untersuchten Rückseitenmaterialien über indirekte Lichtreflexion zu einer Leistungssteigerung von 4 bis 7 Watt führen können und die Verkapselungsmaterialien Absorptionsverluste im Bereich von 1 bis 6 Watt verursachen.

Um eine maximale Modulleistung zu erreichen, müssen alle genannten, die Effizienz beeinflussenden Effekte ganzheitlich betrachtet werden. Die Zell-zu-Modulverluste lassen sich durch innovative Materialien – z. B. lichtlenkende Elemente oder hochtransparente Frontmaterialien – sowie durch optimale Moduldesigns minimieren, bis hin zu einem Mehrertrag im Vergleich zur eingesetzten Zelleistung. Speziell für hocheffiziente Zellkonzepte, wie bifaziale oder Rückkontaktsolarzellen, ist die Bilanzierung der Zell-zu-Modulverluste bedeutsam für eine effiziente Verschaltung und ertragsoptimierte Einbettung.



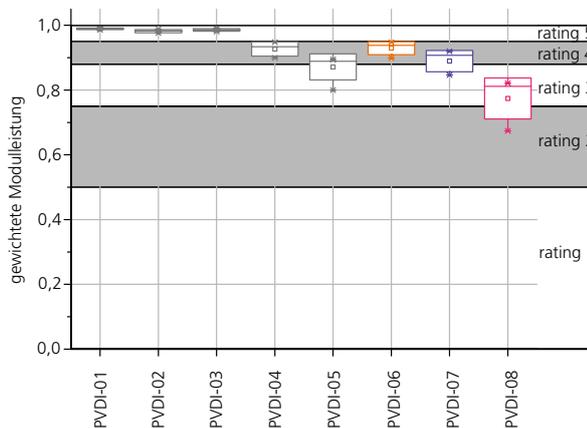
PHOTOVOLTAIC MODULE DURABILITY INITIATIVE (PVDI)

PV-Module werden überwiegend nach den relevanten IEC-Standards (IEC 61215, IEC 61646, IEC 61730) geprüft und zertifiziert. Diese Prüfungen setzen damit weltweit einen einheitlichen Basisqualitätsstandard. Dennoch werden auch bei zertifizierten PV-Modultypen Defekte und Fehler im Feld beobachtet. Es treten zudem Fehlermodi im Feld auf, die in der aktuellen Version der IEC-Standards nicht geprüft werden. Das Fraunhofer ISE und das Fraunhofer CSE (USA) haben mit der »Fraunhofer PV Module Durability Initiative (PVDI)« ein vergleichendes Prüfprogramm entwickelt, das über die gültigen IEC-Standards hinausgeht und aktuelle Fehlermodi aufnimmt.

Claudio Ferrara, Georg Mühlhöfer, Daniel Philipp, Sandor Stecklum, Harry Wirth

Für das Fraunhofer PVDI-Programm werden die zu prüfenden PV-Module bevorzugt auf dem freien Markt bezogen. Die so beschafften 16 PV-Module werden nach der Eingangscharakterisierung aktuell auf vier Labor-Prüfsequenzen sowie die Freibewitterung mit Monitoring am Standort Albuquerque in New Mexico (USA) aufgeteilt. Zunächst wird die Sensitivität der PV-Module bezüglich Potentialinduzierter Degradation untersucht. Die Prüfung wird dreimal wiederholt, unterbrochen von der Zwischencharakterisierung und beendet mit einer Erholungsphase. In der zweiten Testsequenz wird das Verhalten der PV-Module auf Feuchte-Frost-Zyklen und auf UV-Strahlung untersucht. In der dritten Testsequenz wird die Widerstandsfähigkeit der Prüflinge auf zyklische und statische mechanische Lasten bei tiefen Temperaturen untersucht. Die Temperaturwechselprüfungen sollen die Ausbreitung von Defekten sichtbar machen. Die vierte Testsequenz dient als Referenz zur Temperaturwechselprüfung mit 200 Zyklen aus dem IEC-Standard, geht aber mit insgesamt 600 Zyklen darüber hinaus. Von den drei PV-Modulen, die in New Mexico über

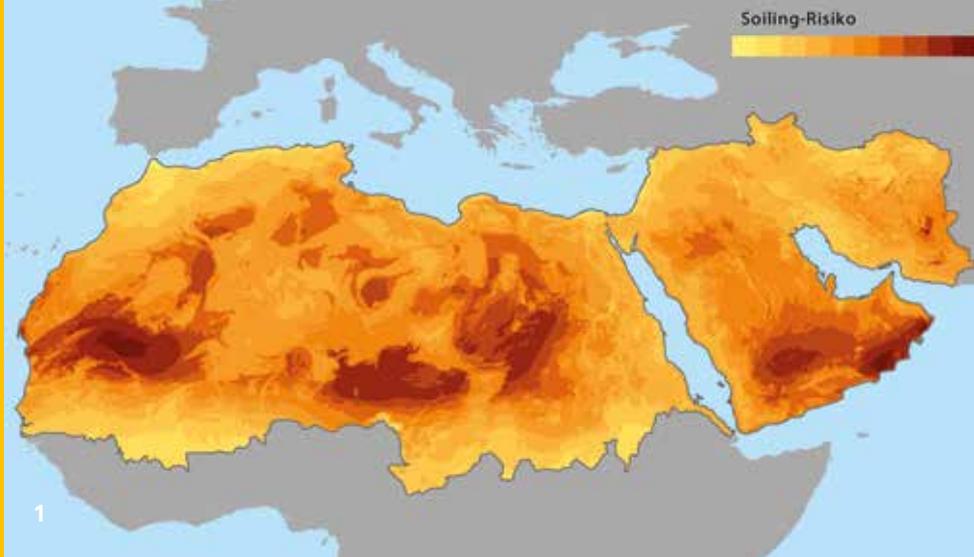
1 Schematische Darstellung des vergleichenden Prüfprogramms im Rahmen der Fraunhofer PV Module Durability Initiative (PVDI).



2 Klassifizierung der geprüften PV-Module nach der dynamischen mechanischen Belastung.

drei Jahre im Freiland exponiert werden, erfassen wir an einem PV-Modul dauerhaft die Leistungsdaten. Alle sechs Monate wird die Leistung aller drei Prüflinge unter Standardtest-Bedingungen im Labor vermessen.

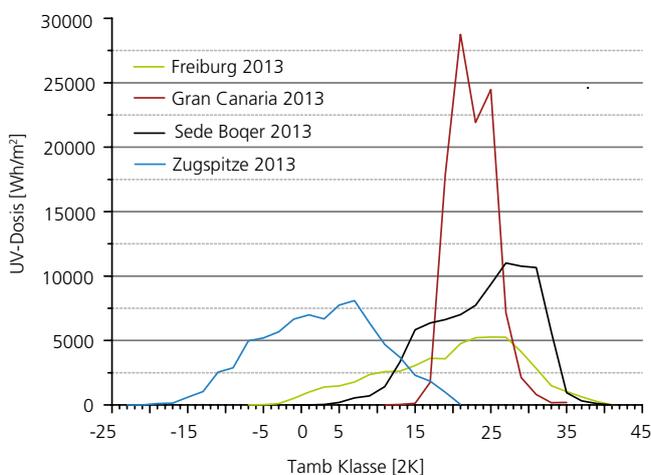
Seit 2011 wurden im Fraunhofer PVDI Programm acht PV-Modultypen von acht verschiedenen Herstellern geprüft. Aus der mit der Endmessung gewichteten normalisierten Modulleistung wird für jede Prüfsequenz eine Klassifizierung zwischen 1 (untere Klasse) und 5 (obere Klasse) erstellt (Abb. 2).



MAPPING UND KLASSIFIZIERUNG DER PV-MATERIALBELASTUNG

Materialien und Komponenten von PV-Modulen sind variierenden Witterungseinflüssen ausgesetzt, die eine große Auswirkung auf Lebensdauer und Leistung der Systeme haben (Abb. 2). Künftig werden verstärkt Regionen mit rauerem Klimabedingungen in den Fokus der PV rücken. Dazu fehlt es derzeit an konkreten Informationen über die klima- und umweltbedingten Risiken für PV-Anlagen. Eine globale Klassifikation der vorherrschenden Stressbedingungen ist für die Auswahl optimaler Materialien und die Abschätzung der Lebensdauer erforderlich. Ein solches räumliches Klassifikationssystem standortabhängiger Stressbedingungen wird am Fraunhofer ISE mit Hilfe eines Geographischen Informationssystems (GIS) entwickelt.

Jan Herrmann, Michael Köhl, Christian Schill,
Karolina Slamova, Karl-Anders Weiß, Harry Wirth



2 Charakteristische Häufigkeitsverteilung der kombinierten Belastung von UV-Strahlung und Umgebungstemperatur an vier Freibewitterungsstandorten des Fraunhofer ISE.

1 GIS-basierte Kartierung des qualitativen Verschmutzungsrisikos im Nahen Osten und Nordafrika (MENA-Region) auf Basis von globalen Satellitendaten und historischen meteorologischen Daten aus Bodenmessungen.

Durch verschiedene Umwelteinflüsse bedingte Belastungen für Materialien und Komponenten sind wichtige Faktoren für die Lebensdauer und Leistung von PV-Modulen. Vorzeitige Materialermüdung und Leistungseinbußen wirken sich negativ auf Ertrag, Energiegestehungskosten und somit auf die ökologische und ökonomische Nachhaltigkeit der solaren Energiegewinnung aus. UV-Strahlung, hohe Temperaturen, relative Luftfeuchtigkeit, Betauungsdauer, Feuchte-Wärme-Zyklen, atmosphärische Korrosivität, Staubablagerungen (Soiling) und Feuchtigkeitseintritt konnten als kritische Belastungsfaktoren für PV identifiziert werden. Typische Degradationseffekte sind die Vergilbung von polymeren Einkapselungsmaterialien, die Delamination der Einkapselung und Rückseitenfolien oder die Korrosion von Verbindungselementen.

Um die Lebensdauer von solartechnischen Komponenten im weltweiten Einsatz abzuschätzen und die verwendeten Materialien nachhaltig zu verbessern, wird am Fraunhofer ISE ein räumliches, GIS-basiertes Stressklassifikationssystem entwickelt. Damit können die standortspezifischen Beanspruchungen bereits in der Entwicklungs- und Planungsphase berücksichtigt werden. Eine räumlich aufgelöste, globale Stressklassifikation bietet wichtige Informationen für Materialhersteller und andere Stakeholder wie Anlagenplaner, Versicherungen und Investoren. Forschungsarbeiten wie die Kartierung des Soiling-Risikos in der MENA-Region (Abb. 1), die Analyse der Korrosion in Küstenregionen oder die Klassifizierung der UV-Belastung sind wichtige Bausteine einer solchen umfassenden Stressklassifikation.



ERFASSUNG VON SOILING-EFFEKTEN UND PRÜFUNG VON BESCHICHTUNGEN

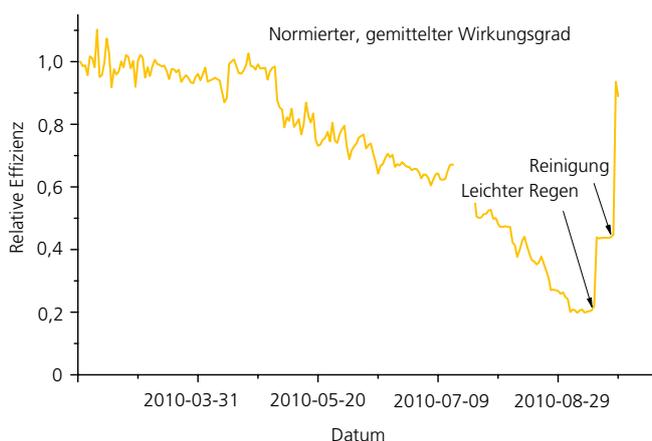
Sonnenreiche Wüstengebiete, etwa in der MENA-Region, rücken zunehmend in den Fokus der PV-Industrie. Unter den dortigen Bedingungen verursachen an Oberflächen anhaftende Schmutzpartikel – das sogenannte »Soiling« – erhebliche Ertragseinbußen. Verstärkt wird dieser Effekt durch Meeresnähe, Taubildung bei hoher Luftfeuchtigkeit und Temperaturschwankungen. Zur Gebrauchsdauerabschätzung von PV-Modulen ist das Verständnis der Schmutz-Material-Wechselwirkungen grundlegend. Klimamodellierung (GIS), beschleunigte Alterungsprüfungen und realitätsnahe Soiling-Tests helfen, Gegenmaßnahmen wie funktionelle Beschichtungen zu qualifizieren und deren Langzeitstabilität zu untersuchen.

Jan Herrmann, Elisabeth Klimm, Michael Köhl, Timo Lorenz, Daniel Philipp, Christian Schill, Karolina Slamova, Karl-Anders Weiß, Harry Wirth

Anorganische Materialien wie Sand und Staub haften besonders in Wüstenregionen an Oberflächen und führen dadurch zu Ertragsminderungen. Im schlimmsten Fall wird die Materialoberfläche zusätzlich von chemischen Reaktionen oder Abrasion durch scharfkantige Partikel geschädigt. Die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Sands, wie auch die Klimabedingungen sind stark ortsabhängig und beeinflussen das Verschmutzungsverhalten von Oberflächen wesentlich. Das Klimamonitoring des Fraunhofer ISE ermöglicht die Aufbereitung und Darstellung von Belastungs- und Klimadaten mittels Geographischer Informationssysteme (GIS) in Soiling-Risikokarten. Auf Basis der Klimadaten und Technologieanforderungen wurden spezielle Prüfeinrichtungen und Prüfverfahren entwickelt, die es erlauben, die Oberflächen von Verglasungsmaterialien und von speziellen Beschichtungen auf ihr Verschmutzungsverhalten zu untersuchen. Dabei ist es möglich, durch die Verwendung lokaltypischer Sände

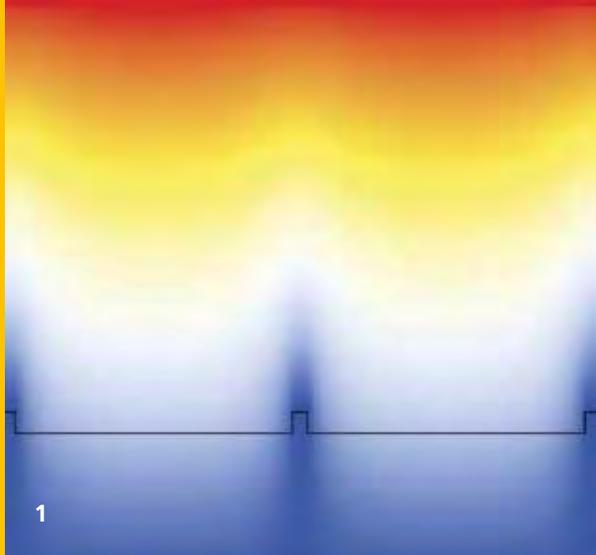
1 Solarmodule am Freibewitterungsteststand des Fraunhofer ISE auf Gran Canaria.

2 Verschmutzung auf einem photovoltaischen Modul zur Vermessung der Leistungseinbußen durch Staub und Sand.



3 Reduktion des gemittelten Wirkungsgrads verschiedener Modultypen um 80 % innerhalb von acht Monaten verursacht durch Verschmutzung. Regen im September 2010 entfernte die Verschmutzung partiell, eine Komplettreinigung erfolgte durch Servicepersonal.

und Klimabedingungen, wie trockene oder feuchte Sände (mit oder ohne Kondensation), realistische Bedingungen herzustellen. Die Bewertung erfolgt durch die spektrale Transmissionsminderung aufgrund der Verschmutzung und anhand der Menge des angelagerten Materials. Ergänzt werden diese Messungen durch Prüfungen der Alterungsbeständigkeit der Oberflächen, um deren dauerhafte Funktionalität zu gewährleisten. Die Erkenntnisse fließen auch in die Ermittlung optimierter Reinigungsstrategien und die Wirtschaftlichkeitsbewertung der Beschichtungen ein.



1

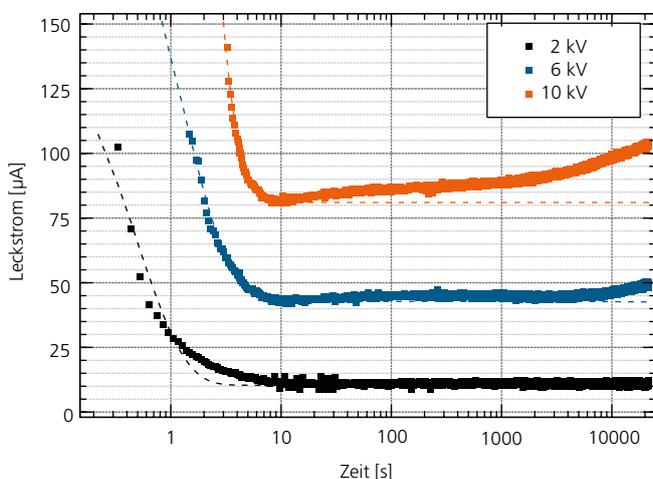


2

LADUNGSTRANSPORT IN SOLARMODULEN BEI HOCHSPANNUNGSBELASTUNG

Auch in neu installierten PV-Anlagen sind Solarmodule zu finden, die Leistungsverluste durch Potentialinduzierte Degradation (PID) aufweisen. Ein tiefergehendes Verständnis des PID-Effekts – besonders der auftretenden elektrischen Feldverteilungen und der Leckströme im Modul während einer Hochspannungsbelastung – ist für nachhaltige Materialverbesserungen nötig. PID-hemmende Maßnahmen – wie verändertes Design, Verkapselungsmaterialien mit geringer Ionenleitfähigkeit und modifiziertes Frontglas – wurden getestet. Wir haben ein Simulationsprogramm zur Modellierung der elektrischen Feldverteilung in realen Solarmodulen entwickelt und Leckströme mit einem speziellen Hochspannungs-Messplatz detailliert untersucht.

Stephan Hoffmann, **Thomas Kaden, Michael Köhl**,
Hans Joachim Möller, Andreas Bett, Harry Wirth



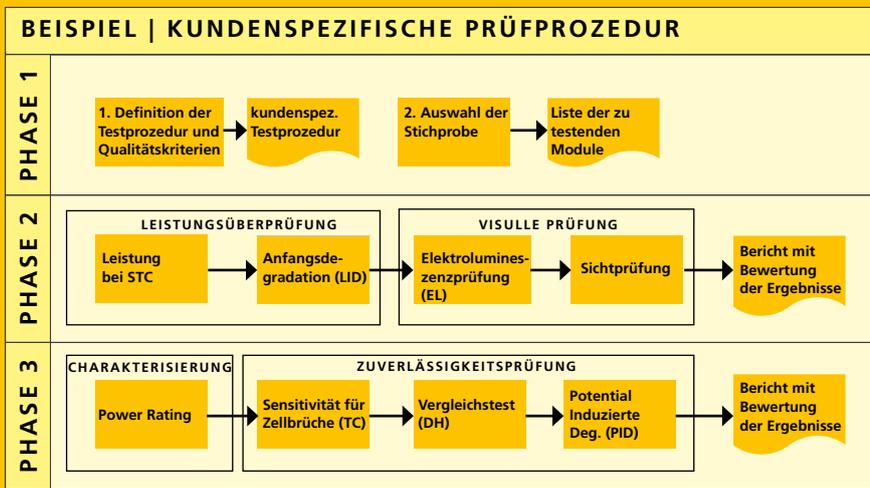
3 Zeitabhängige Leckströme bei verschiedenen Testspannungen in einem multikristallinen Siliciumsolarmodul mit starkem PID-Effekt.

1 Simulierte elektrische Feldverteilung im Querschnitt eines Solarmoduls unter Hochspannung. Der Ausschnitt zeigt zwei Kontakte auf einer Solarzelle.

2 Hochspannungs-Messplatz am Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM in Freiberg. Dort sind Testspannungen bis 20 kV möglich.

Das Fraunhofer ISE hat einen Prozess entwickelt, mit dem es möglich ist, gezielt und reproduzierbar PID-anfällige Zellen herzustellen. Mit Hilfe dieser Zellen haben wir PID-hemmende Maßnahmen auf Modulebene verglichen. Die Lamine wurden unter vom IEC-Normentwurf abweichenden Bedingungen getestet. Sie wurden mit leitfähiger Aluminiumfolie bedeckt; die Potentialdifferenz betrug -1 kV DC. Die Temperatur wurde auf 60 °C erhöht, die Dauer dafür auf 16 h verkürzt. Damit ergab sich eine Beschleunigung im Vergleich zum 25 °C / 168 h-Test um ca. 2,5. Während das als empfindlich eingestufte Referenzdesign V01 deutlich PID zeigt, blieben alle anderen Variationen stabil. Das am Fraunhofer ISE entwickelte TPedge-Modul erweist sich als PID-stabil. Des Weiteren haben wir ein speziell behandeltes Glas mit einer Diffusionsbarriere für Ionen in Form einer abgeschiedenen Schicht getestet. Lamine mit diesem Glas zeigten deutlich reduzierte Leckströme und wesentlich geringere PID.

Um Leckströme genauer zu untersuchen, nutzt das THM einen speziellen Hochspannungs-Messplatz, der Testspannungen bis 20 kV ermöglicht. Damit ist eine deutliche Intensivierung des PID-Effekts sowie die Untersuchung sehr kleiner Einflüsse auf den Leckstrom – wie etwa die Ionenbewegung aus dem Modulglas – möglich. Prinzipiell kann der Anfangsverlauf der zeitabhängigen Leckströme durch einen kapazitiven Ladestrom im Modul beschrieben werden. Eine zusätzliche Komponente zeigte sich bei längerer Versuchsdauer. Bei höheren Spannungen setzte sie früher ein (Abb. 3). Die zusätzliche Ladung korreliert mit dem Leistungsverlust.



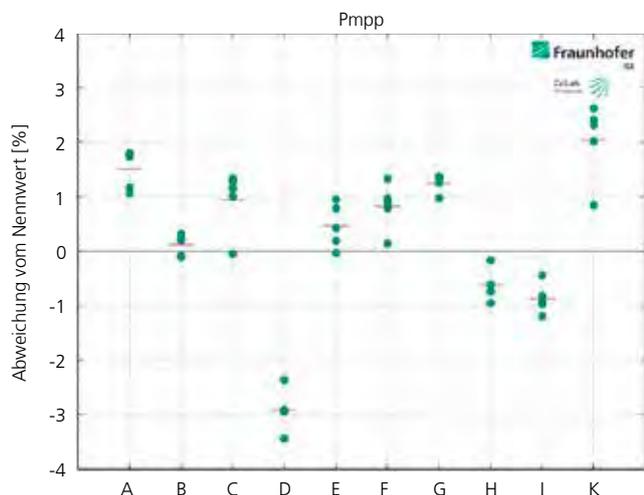
QUALITÄTSBENCHMARKING VON PV-MODULEN

Das Qualitätsbenchmarking ist eine gemeinsam mit Projektierern und Distributoren entwickelte Prozedur zur zeit- und kostenoptimierten Prüfung von PV-Modulen. Es erfüllt die Anforderung, in einem sehr dynamischen Markt mit sich rasch ändernden Produktvarianten, in kürzester Zeit eine Aussage über die Qualität einer ausgewählten Charge eines Modultyps zu machen. Basierend auf den Qualitätsanforderungen der Kunden und den Einsatzgebieten der Module definieren wir eine individuelle Prüfprozedur und Pass / Fail-Kriterien. Das Verfahren führt so zu einer objektiven, vom Hersteller unabhängigen Bewertung der Module. Bei unseren Kunden ist es ein zentraler Baustein der Qualitätssicherung.

Boris Farnung, Klaus Kiefer, Frank Neuberger, Daniel Philipp, Harry Wirth

Ein Beispiel für eine kundenspezifische Prüfprozedur mit verschiedenen Prüfphasen zeigt Abb. 1. Nach der Festlegung der Prozedur und der Auswahl der Stichprobe in Phase 1 überprüfen wir in Phase 2 die vom Hersteller angegebenen elektrischen Parameter (Datenblatt und Typenschildangaben) sowie das äußere Erscheinungsbild der verwendeten Komponenten (Rahmen, Stecker, Anschlussdose, Lötverbinder etc.), auch hinsichtlich der Qualität der Verarbeitung. Die ersten Prüfungen dienen dabei der Selektion von sogenannten »Best of Class«, also von Modultypen, die sich auf Basis der ersten Ergebnisse qualifiziert bzw. die Kriterien erfüllt haben. Prüflinge, die diese vorab definierten Qualitätskriterien nicht erfüllen, werden nicht weiter untersucht. Damit werden Kosten für die in Phase 3 durchgeführten, aufwendigeren Prüfungen gespart. Die in Phase 3 empfohlenen Power-Rating-Messungen liefern gleichzeitig die erforderlichen Eingangsdaten für präzise Ertragsprognosen. In dieser Phase werden bei den Modulen auch für die Zuverlässigkeit wichtige Eigenschaften wie die Anfälligkeit für Zellbrüche und Schneckenspuren getestet.

1 Beispiel einer kundenspezifischen Prüfprozedur.



2 Beispiel für die Bewertung der Modulleistung von zehn verschiedenen Modultypen im Rahmen eines Qualitätsbenchmarks. Der Vergleich zeigt zum Teil erhebliche Abweichungen zwischen den verschiedenen Modultypen hinsichtlich der tatsächlichen Modulleistung und der angegebenen Nennleistung.

Ergänzend können Materialprüfungen durchgeführt werden, die die besonderen Betriebsbedingungen am geplanten Anlagenstandort oder die Besonderheiten einer Modultechnologie berücksichtigen.

Das Qualitätsbenchmarking mit den vorgestellten Prüfungen liefert in wenigen Tagen eine fundierte Aussage über die Performance und Verarbeitung der getesteten Produkte und identifiziert Abweichungen zum Stand der Technik. Durch die Zuverlässigkeitsprüfungen werden Degradationsmechanismen und Produktfehler erkannt. Darüber hinaus wird das Risiko von Fehlern im Feld minimiert.



QUALITÄTSSTANDARDS FÜR DIE BANKABILITY VON PV-KRAFTWERKEN

Investitionsentscheidungen für PV-Kraftwerke werden meist auf Basis der zu erwartenden Stromgestehungskosten (LCOE) getroffen. Eine belastbare LCOE-Prognose für neue oder bestehende Kraftwerke erfordert hohe Qualitätsstandards. Aus den Eingangsparametern der LCOE-Kalkulation lassen sich Qualitätssicherungsmaßnahmen ableiten, die sicherstellen, dass die Erwartungen von Banken und Investoren erfüllt werden. In einem Benchmarking der 300 vom Fraunhofer ISE überwachten PV-Anlagen für das Jahr 2014 zeigte sich, dass PV-Kraftwerke, die solchen Qualitätssicherungsmaßnahmen unterliegen, deutlich höhere Erträge und eine gute langfristige Performance erreichen. Basierend auf diesem Benchmarking haben wir zusammen mit Partnern neue Qualitätsstandards zur Bewertung von PV-Kraftwerken erstellt.

Boris Farnung, Klaus Kiefer, Björn Müller, Harry Wirth

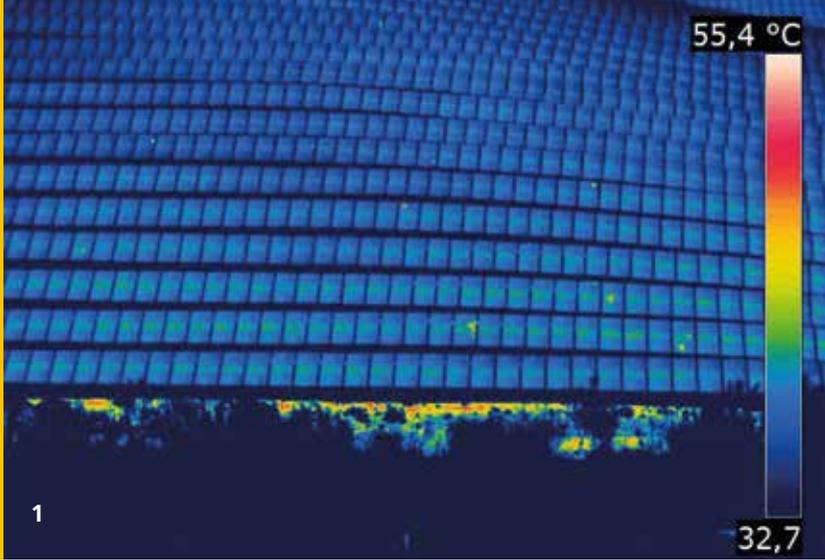


2 Jahresauswertung der Performance Ratio von 300 PV-Kraftwerken 2014. Die rote Linien markieren Kraftwerke mit Qualitätssicherung durch das Fraunhofer ISE.

1 Der Solarpark Lieberose bei Cottbus.

Eine wichtige Kennzahl für die Qualität eines PV-Kraftwerks sind die Stromgestehungskosten (Levelized Cost of Energy, LCOE). Die LCOE für Kraftwerke in Europa liegen heute typischerweise im Bereich von 0,08 bis 0,12 €/kWh. Wichtige technische Eingangsparameter dieses Werts sind die anfängliche Performance Ratio (PR), der anfängliche Modulwirkungsgrad, die Einstrahlung auf Modulebene und die jährliche Leistungsminderung der PV-Anlage. Für all diese Eingangsparameter lassen sich Qualitätssicherungsmaßnahmen ableiten, die sicherstellen, dass die Erwartungen von Banken, Investoren und Versicherungen erfüllt werden. Denn je nach Sichtweise des Projektbeteiligten bestehen unterschiedliche Erwartungshaltungen. Der Projektentwickler und der spätere Betreiber der Anlage streben nach einer möglichst hohen Performance bei geringem Wartungsaufwand. Der finanzierenden Bank ist eine fristgerechte Tilgung wichtig, und der Investor erwartet möglichst hohe Renditen bei geringem Risiko.

Bei einem Benchmarking der 300 vom Fraunhofer ISE überwachten PV-Kraftwerke konnte gezeigt werden, dass Kraftwerke mit kontinuierlicher Qualitätssicherung deutlich höhere Erträge und eine gute langfristige Performance aufweisen. Daher und aufgrund der verstärkten Nachfrage nach Bewertungen von Bestandsanlagen hat das Fraunhofer ISE sein Dienstleistungsangebot um zusätzliche Qualitätssicherungsmaßnahmen – wie herstellerunabhängige Energy Ratings für PV-Module, Anlagenzertifizierungen in Kooperation mit dem VDE, Validierung des kraftwerkseigenen Monitorings und Performance-Bewertungen auf der Basis von Messdaten – erweitert.



REPOWERING VON PV-KRAFTWERKEN

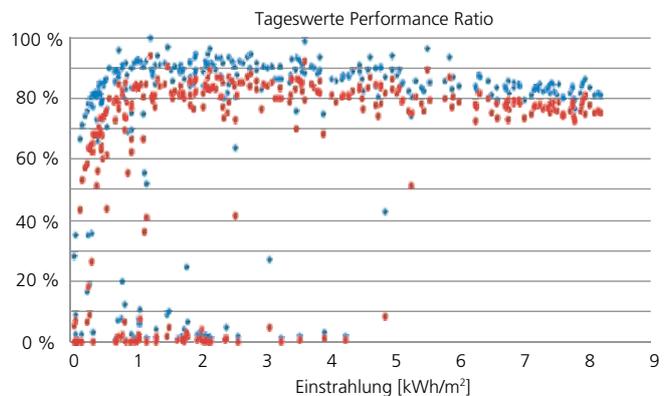
Mit der Novellierung des EEG im Jahr 2004 und dem dadurch beschleunigten Zubau von PV-Kraftwerken überschritt die installierte Leistung in Deutschland die GW-Marke. Damit steigt die Zahl der Anlagen, die seit mehr als 10 Jahren in Betrieb sind. Aus unterschiedlichen Gründen kann der Ertrag dieser Anlagen deutlich von den heute möglichen Erträgen abweichen. Die teilweise Erneuerung eines PV-Kraftwerks – auch als »Repowering« bezeichnet – kann den Ertrag wieder auf das Niveau einer Neuanlage heben. Zur Vorbereitung solcher Maßnahmen muss deren Wirksamkeit und damit die Wirtschaftlichkeit individuell beurteilt werden. Hier bieten wir unsere Unterstützung an.

Klaus Kiefer, **Christian Reise**, Harry Wirth

Zunächst werden im Rahmen einer Performance-Ratio-Bewertung die tatsächlichen Betriebsergebnisse des letzten Jahres mit rechnerischen Werten verglichen. Sofern vorhanden, liefern die Ertragsgutachten aus der Zeit der Anlagenplanung den ersten Vergleichswert. Neu berechnen wir den für das letzte Jahr erwarteten Ertrag für den tatsächlichen Anlagenaufbau – mit Berücksichtigung der Moduldegradation seit Inbetriebnahme des Kraftwerks. Und schließlich wiederholen wir die Simulation mit den Daten heute erhältlicher PV-Module und Wechselrichter. Weitergehende Änderungen im Anlagen-design (Modulneigung, Reihenabstand, Montagegeometrie) können ebenfalls berücksichtigt werden. Sie sind jedoch nur selten wirtschaftlich umsetzbar.

Damit stehen eine Vielzahl von Daten für Erträge, Komponentenverhalten und Performance Ratio zur Verfügung, aus denen wir nun gezielt die jeweils größten Verbesserungspotenziale ableiten können. Der Austausch der Wechselrichter ist häufig eine Option, die sowohl den Wirkungsgrad als auch die Verfügbarkeit der Anlage verbessert. Ein Umbau der Modul-

1 Thermographie-Aufnahme zur Identifikation auffälliger Module.



2 Vergleich von Tageswerten der Performance Ratio vor (rot) und nach (blau) einem Wechselrichtertausch. Hier wurden 6-kW-Einheiten aus dem Jahre 2006 durch aktuelle 20-kW-Einheiten ersetzt. Der Anlagenwirkungsgrad stieg dabei um etwa 6 %.

verkabelung kann das DC-Spannungsniveau – angepasst an einen neuen Wechselrichter – vorteilhaft ändern. Schließlich können auffällige PV-Module getauscht werden. Der Austausch einzelner Module bietet sich bei singulären Defekten (Glasbruch, Zellbruch, Defekte in den Anschlussdosen) an. Hier führen individuelle Tests vor Ort (visuelle Inspektion, Leistungsmessungen, Thermographie-Aufnahmen) zu einem Austauschplan.

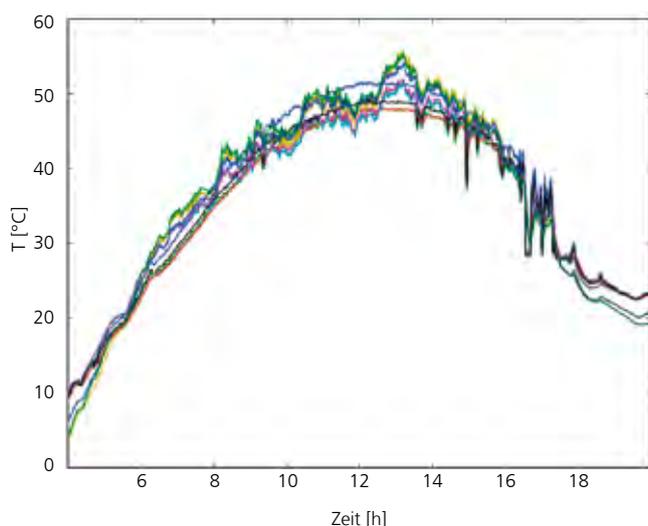


© CEA

SIMULATION DER BETRIEBSTEMPERATUR VON BIPV-SYSTEMEN

Bauwerkintegrierte Photovoltaische Systeme (BIPV) sind Bauteile, die mittels Photovoltaik Elektrizität erzeugen. Dagegen sind BAPV-Systeme (Building-Applied Photovoltaic Systems) PV-Elemente, die an das Gebäude »angelegt« werden, wie Aufdachsysteme. In vielen BIPV-Anwendungen spielt die Betriebstemperatur der Anlage für die Bauplanung eine große Rolle. Im europäischen Projekt »SOPHIA« wurden unterschiedliche Ansätze angewandt, um die Betriebstemperatur einer BIPV-Anlage zu simulieren. Die Ergebnisse von vier europäischen Forschungsinstituten wurden mit Temperaturmessungen einer BIPV-Anlage verglichen und die Auswirkungen auf den Ertragsverlauf untersucht.

Tilmann Kuhn, **Wendelin Sprenger**, Hans-Martin Henning



2 Gemessene (dunkelblau) und verschieden simulierte (alle anderen Farben) Modulrückseitentemperatur einer in Chambéry (CEA/INES) vermessenen hinterlüfteten BIPV-Anlage mit 15° Neigung und südlicher Ausrichtung. Die Quantifizierung der Übereinstimmung der simulierten und gemessenen Modulrückseitentemperaturen erfolgte mit den statistischen Maßen R^2 und RMSE.

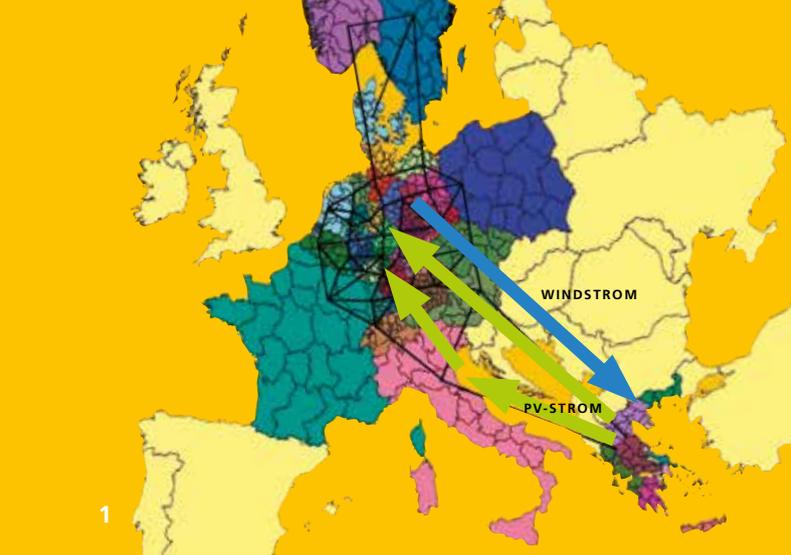
1 BIPV-Teststand von CEA, der für die Modellierungen genutzt wurde.

Durch fallende Preise in der Photovoltaik und durch neue EU-Bauvorschriften ist das Interesse an BIPV in den letzten Jahren stark angestiegen. Ökonomische Vergleiche mit den zu ersetzenden Bauteilen zeigen, dass BIPV-Systeme konkurrenzfähig sind. Es müssen allerdings noch Kostensenkungspotenziale, etwa durch vereinfachte Zulassungsverfahren und Massenproduktion, ausgeschöpft werden. Für BIPV-Elemente mit Wasserdichtigkeits- oder Wärmedämmfunktion, die einen deutlich verringerten Wärmeübergang an der Rückseite der aktiven Schicht aufweisen, muss der Betriebstemperaturverlauf berechnet werden. Das europäische Forschungsprojekt »SOPHIA« ermöglicht die Abstimmung der Simulationsprogramme unterschiedlicher europäischer Forschungsinstitute. Anhand der Monitoring-Daten einer geeigneten BIPV-Anlage konnten die Auswirkungen der Temperaturerhöhung auf den Gesamtertrag der Anlage validiert und analysiert werden.

Zum Vergleich wurden auch einfachere Simulationsansätze angewandt. Das lineare Modell und das NOCT-Modell verwenden nur Einstrahlungsmessungen und Außentemperatur als Referenz. Das komplexeste angewandte Modell berücksichtigt Himmelstemperatur, Windgeschwindigkeit und -richtung, innere Struktur des Moduls und die Wärmekapazitäten der einzelnen Schichten. Der Detaillierungsgrad der Simulation wurde am Fraunhofer ISE weiter entwickelt und dabei gezeigt, dass bei BIPV-Isolierverglasungen die Wärmekapazität und bei hinterlüfteten Fassaden die Variabilität des internen und externen Wärmeübergangs berücksichtigt werden müssen.

Das Projekt wurde von der Europäischen Union im Rahmen von »FP7« ermöglicht.

www.sophia-ri.eu



© iStock.com / hwdyl

DIE ROLLE VON PV-KRAFTWERKEN IM EUROPÄISCHEN ENERGIESYSTEM

Die gesunkenen Stromgestehungskosten und die gestiegene Anzahl von PV-Installationen in vielen europäischen Ländern erhöhen die Bedeutung der PV für die Stromversorgung. Mit einer modellgestützten Analyse der künftigen Stromerzeugungsstruktur und Übertragungsnetzinfrastruktur untersuchen wir, wie sich die flächendeckende Zunahme von PV-Anlagen im Zusammenspiel mit anderen Erzeugungstechnologien und vorhandenen Netzübertragungskapazitäten auswirkt. Im Projekt »RES-DEGREE« analysieren wir die Auswirkungen einer verstärkten Nutzung von PV in Deutschland und Griechenland sowie den potenziellen Stromaustausch von EE-Strom zwischen beiden Staaten über Transitländer. Mit dem Modell »RESlion« kann zusätzlich eine künftige optimale geographische Verteilung von PV-Anlagen untersucht werden.

Niklas Hartmann, **Christoph Kost**, Charlotte Senkpiel, Thomas Schlegl

Die Stromerzeugungsstruktur vieler europäischer Staaten befindet sich durch den Ausbau von Wind- und Solarkraftwerken und der damit zunehmenden Erzeugung aus EE-Anlagen im Wandel. Unsere modellgestützte Energiesystemanalyse bietet die Möglichkeit, PV-Kraftwerke, andere EE-Anlagen und das gesamte Energiesystem detailliert abzubilden. Durch eine zusätzliche Einbindung von Geoinformationssystemen (GIS) können zudem Potenziale der einzelnen Technologien geographisch detailliert ermittelt und berücksichtigt werden. Damit leistet das Fraunhofer ISE einen wichtigen Beitrag zur optimalen Planung weiterer erneuerbarer Stromerzeugungsanlagen in nationalen Energiesystemen – auch unter Berücksichtigung einer stärker koordinierten EU-Energiepolitik.

- 1 Modellregionen von »RESlion« zur Untersuchung des optimalen Ausbaus von erneuerbaren Energien, deren Erzeugung und Strom-austausch in Mitteleuropa sowie mit Griechenland.
- 2 In vielen europäischen Staaten verändert sich die Stromerzeugungsstruktur hin zur vermehrten Nutzung erneuerbarer Energien. Mit unseren Modellen können wir komplette Energiesysteme abbilden.

Das Fraunhofer ISE beschäftigt sich besonders mit der Frage, welche PV-Erzeugungskapazitäten in welchen Regionen vorteilhaft für das gesamte Stromsystem sind und wie diese betrieben werden sollten. Die Fragestellung wird auch unter dem Blickwinkel untersucht, wie verschiedene europäische Staaten zur Steigerung des EE-Stromaustauschs über Ländergrenzen hinweg gekoppelt werden können.

Abb. 1 zeigt eine detaillierte Modellabbildung von Deutschland (mit Regionen), seinen Nachbarländern und Griechenland. Potenzielle Stromflüsse zwischen Deutschland und Griechenland – unter Berücksichtigung einer optimalen, kostengünstigen Ausbau- und Einsatzplanung von konventionellen und erneuerbaren Kraftwerken – sowie Übertragungskapazitäten zwischen den Regionen können mit der Modellierung untersucht und auf ihre Wirtschaftlichkeit analysiert werden.

Das Projekt »RES-DEGREE« wird durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

SOLARTHERMIE



Für die Energiewende ist auch die Solarwärme ein zentraler Baustein. International hängt die Rolle der Solarthermie einerseits an der Kostenentwicklung in Produktion und Vertrieb, andererseits an länderspezifischen Randbedingungen und Marktbedürfnissen. Forschung und Entwicklung kann hier kostengünstige Materialien, Produktionsverfahren und in Bezug auf Investition und Ertrag optimierte Gesamtsysteme entwickeln.

Solarthermische Flach- und Vakuumröhrenkollektoren sind heutzutage zuverlässige Standardprodukte, die im Wettbewerb der Qualitätssicherung und Zertifizierung bedürfen. Wir bieten dies seit vielen Jahren im TestLab Solar Thermal Systems an. Über die Mitarbeit in Normung und Solar Keymark gestalten wir die Richtlinien für neuartige Produkte. So konnten wir bei der Normprüfung von Luftkollektoren und Kollektoren mit kombinierter photovoltaischer Stromerzeugung unsere Erfahrungen mit der Technologie einbringen. Auch bei linear konzentrierenden Kollektoren mit Betriebstemperaturen von 150 °C bis zu 550 °C arbeitet unser Institut führend an verschiedensten Prüfungen und unterstützt die Produktoptimierungen. Unterschiedliche Anforderungen sind hier bei solarthermischen Großkraftwerken und bei der Erzeugung von Prozessdampf vorhanden.

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

Mit unserem Technologieportfolio zur dezentralen Wasseraufbereitung bauen wir nicht nur autarke Trinkwassersysteme auf – optimiert für die jeweilige Wasserqualität – sondern beschäftigen uns auch mit der Trennung industrieller Stoffsysteme.

Systemtechnische Fragestellungen wie Hydraulikoptimierung, intermittierende Betriebsführung und Speichereinbindung sind für solarthermische Großanlagen, von der Brauchwassererwärmung bis hin zu Kraftwerken, entscheidend für Funktion und Wirtschaftlichkeit. Unsere umfassende dynamische Simulationsplattform entwickeln wir fortwährend weiter und ergänzen neue Komponenten. Monitoringdaten von Demonstrationsprojekten nutzen wir für Validierungen. Mit Erweiterung des Polygenerationslabors haben wir 2014 einen weiteren Schritt zu einem experimentellen Systemtechnikum getan.

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

Besondere Einrichtungen im Geschäftsfeld Solarthermie:

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

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt 93

Mitarbeiter vollzeitäquivalent 73

Zeitschriften- und Buchbeiträge 14

Vorträge und Konferenzbeiträge 32

www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/35



Linear konzentrierender Fresnel-Kollektor.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination	Dr. Werner Platzer	Telefon +49 761 4588-5983 werner.platzer@ise.fraunhofer.de
Thermische Solaranlagen	Dr. Wolfgang Kramer	Telefon +49 761 4588-5096 soltherm.systems@ise.fraunhofer.de
Gebrauchsdauer von Kollektoren und Komponenten	Dipl.-Phys. Karl-Anders Weiß	Telefon +49 761 4588-5474 soltherm.reliable@ise.fraunhofer.de
Wärmeübertragung und Wärmetransport	Dr.-Ing. Michael Hermann	Telefon +49 761 4588-5409 soltherm.transfer@ise.fraunhofer.de
Solare Kälteerzeugung	Dipl.-Phys. Edo Wiemken	Telefon +49 761 4588-5531 soltherm.cooling@ise.fraunhofer.de
Solare Prozesswärme	Dr. Werner Platzer	Telefon +49 761 4588-5983 soltherm.process@ise.fraunhofer.de
Solarthermische Kraftwerke	Dr. Thomas Fluri	Telefon +49 761 4588-5994 soltherm.power@ise.fraunhofer.de
Solarthermische Fassaden	Dr.-Ing. Christoph Maurer	Telefon +49 761 4588-5667 soltherm.facade@ise.fraunhofer.de
Dezentrale Wasseraufbereitung	Dr.-Ing. Joachim Koschikowski	Telefon +49 761 4588-5294 soltherm.water@ise.fraunhofer.de



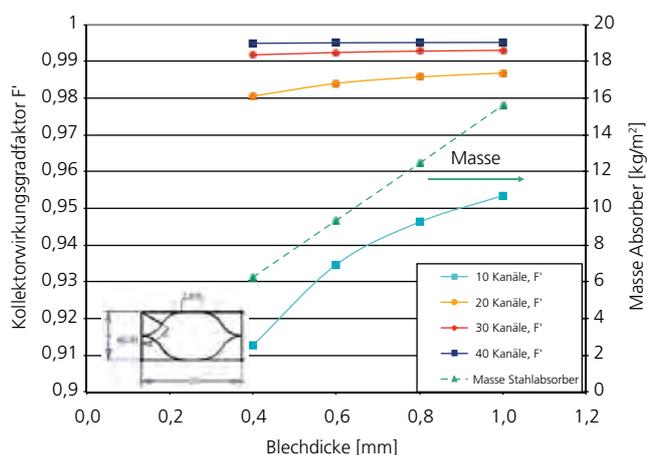
VON ANDEREN BRANCHEN LERNEN: VOM HEIZKÖRPER ZUM SOLARABSORBER

Alternativmaterialien und -fertigungstechnologien bieten großes Potenzial zu Kosteneinsparungen für solarthermische Absorber. Anstelle von Kupfer kann Aluminium oder Stahl eingesetzt werden. Herkömmlich eingesetzte Blech-Rohr-Konstruktionen können durch integrierte Absorber in Massenfertigung ersetzt werden. Flächige Umformverfahren ermöglichen auch für schlecht wärmeleitende Materialien wie Stahl sehr gute thermische Effizienzen. Gemeinsam mit der Firma Gräbener Pressensysteme GmbH & Co. KG adaptieren wir das in der Heizkörperherstellung eingesetzte Hohlpräge-Streckzieh-Verfahren für die Herstellung von Solarabsorbern aus Aluminium und Stahl. Die bereits hergestellten 2 m²-Absorber werden bei uns spektral-selektiv beschichtet und vermessen.

Michael Hermann, Carmen Jerg, Franziska Kennemann,
Lotta Koch, Werner Platzer

In dem untersuchten Hohlpräge-Streckzieh-Verfahren wird zunächst die Kanalstruktur mit einer Kniehebelpresse und einem Folgeverbundwerkzeug in ein Blech geformt. Anschließend werden eine geformte Halbschale mit einem planen Blech oder einer zweiten Halbschale miteinander verschweißt und mit Anschlüssen versehen. Der Einfluss verschiedener Absorber im gleichen Kollektorgehäuse auf die thermische Effizienz des Kollektors kann mit dem Kollektorwirkungsgradfaktor F' beschrieben werden. Wir haben F' für Stahlabsorber mit verschiedenen Blechdicken und Anzahlen von Kanälen pro Absorberbreite berechnet (Abb. 2). Der Kanalabstand sollte möglichst gering sein. In den üblichen Blech-Rohr-Konstruktionen bedeutet ein geringer Kanalabstand zusätzliche Rohre und Verbindungen zum Sammelkanal und somit Extrakosten. Werden flächenumformende Technologien eingesetzt, können zusätzliche Kanäle quasi ohne Mehrkosten gefertigt werden. Für eine hohe thermische Effizienz des Kollektors muss der

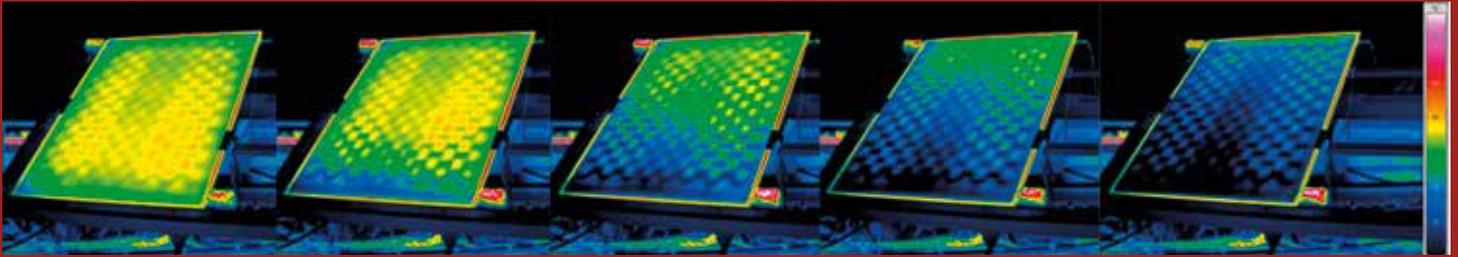
1 *Detailansicht mit Sammelkanal und Steigrohren eines Stahlabsorbers. Der 2 m²-Demonstratorabsorber wurde gemeinsam mit unserem Verbundpartner entwickelt und bei uns vermessen.*



2 *Kollektorwirkungsgradfaktor F' als Funktion der Blechdicke für 10, 20, 30 und 40 Kanäle auf 950 mm Absorberbreite mit dem Material DC01-Stahl (linke Achse), als Wärmeverlustkoeffizient wurde $U_L = 3,5 \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-1}$ angenommen.*

Absorber zudem spektralselektiv beschichtet sein. Wir haben geprüft, ob bereits beschichtetes Material im Umformprozess verwendet werden kann. Unsere Messungen an kommerziell beschichteten Mustern ergaben keine Veränderung im Absorptionsgrad durch Umformung. Der Emissionsgrad hingegen erhöhte sich und wurde somit deutlich schlechter. Die ersten Beschichtungsversuche auf Stahlsubstraten mit unserer Sputteranlage erzielten im Vergleich niedrigere Emissionsgrade. Die besten Resultate erzielten wir auf pulverbeschichtetem Stahlsubstrat. Sowohl der Absorptions- als auch der Emissionsgrad waren vergleichbar mit kommerziellen PVD-Schichten.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.



1

ZERTIFIZIERUNG VON PVT-KOLLEKTOREN

Photovoltaisch-thermische Hybridkollektoren (PVT-Kollektoren) sind derzeit Gegenstand zahlreicher Projekte. Der Marktanteil ist hingegen gering. Bedingt durch eine wachsende Anzahl von Anbietern entstand die Nachfrage nach standardisierten Methoden zur Charakterisierung derartiger Produkte. Auch stellten sich rechtliche Fragen beim Inverkehrbringen derartiger Produkte im europäischen Handelsraum. Ziel des Projekts war, die Transparenz bzgl. technischer Eigenschaften zu erhöhen, einen fairen Wettbewerb zu unterstützen und Markteintrittsbarrieren abzubauen. Es wurden eine Marktübersicht erstellt, fünf verschiedene Produkte empirisch untersucht und ein System-Simulationsmodell erarbeitet.

Sven Fahr, Henning Helmers, **Korbinian Kramer**,
Georg Mühlhöfer, Christoph Thoma, Werner Platzer

Beim Inverkehrbringen von PVT-Kollektoren ist auf die Leistungserklärung gegen die Anforderungen der Niederspannungsrichtlinie (auf Basis von IEC 61730/61215) sowie in naher Zukunft der Bauproduktverordnung zu achten. Zudem streben viele Anbieter an, die Produkte auch mit dem Solar Keymark Label auszeichnen zu können. Dafür ist wiederum eine komplette Prüfung nach der einschlägigen Norm EN ISO 9806 notwendig. Im Kontext der Anwendung dieser Normen entstanden erhebliche Interpretationsspielräume und ungeklärte Fragen, die die Transparenz und Fairness der Bewertungsmethode gefährden. Zusammen mit Projektpartnern (TÜV Rheinland Energie und Umwelt GmbH, FH Düsseldorf, Solarzentrum Allgäu GmbH & Co. KG) startete

1 *PVT-Kollektor bei einem schnellen inneren Temperaturwechsel »Innenschock«, wie er nach EN ISO 9806 durchgeführt wird. Der Test simuliert die Belastungssituation eines Heißstarts einer Anlage. Der Test muss fehlerfrei bestanden werden, um z. B. das Solar Keymark Zertifikat erhalten zu können. Zur Bewertung dient auch das Verfahren der Elektrolumineszenzaufnahme.*

das TestLab Solar Thermal Systems in Abstimmung mit dem TestLab PV Modules ein Projekt, um an den Grundlagen zur Auflösung der Fragen zu arbeiten. Im Rahmen des Projekts wurde eine Marktrecherche zu derzeit tatsächlich marktverfügbaren Produkten (23 Anbieter) durchgeführt. Es wurden insgesamt fünf Produkte ausgewählt und in einer Prüfmatrix empirischen Untersuchungen unterzogen, so dass sich in Kombination mit den Prüfungen, die am TÜV durchgeführt wurden, ein maximaler Erkenntnisgewinn für die Anwendbarkeit der Prüfungen ergab. Außerdem konnten System-Simulationsmodelle erstellt und auf Basis der Parameter, die sich aus den Tests ergaben, Grenzbetrachtungen simuliert werden. Ein wesentliches Ergebnis des Projekts ist ein pränormatives Dokument, das die wichtigsten Fragen bzgl. der Anwendung der bestehenden Prüfungen für PVT-Kollektoren erklärt. Dieses und die im Endbericht veröffentlichten Erkenntnisse aus dem Projekt tragen erheblich zur Sicherung eines fairen Wettbewerbs und eines klar geregelten Marktzugangs bei.

Das Projekt wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützt.



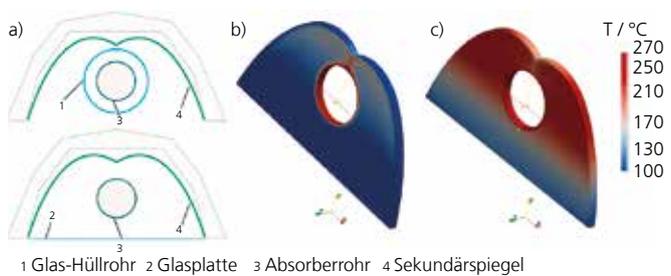
WÄRMEVERLUSTE VON RECEIVERN IN LINEAREN FRESNEL-KOLLEKTOREN

Die Kenntnis der Wärmeverluste linearer Fresnel-Kollektoren ist wichtig für die Systemauslegung, die Abschätzung des jährlichen Ertrags und die Entwicklung von Betriebsstrategien. Neben den Wärmeverlusten selbst sind auch die Temperaturverteilung entlang der Komponenten und die von den Materialien erreichten Maximaltemperaturen von großer Bedeutung, vor allem für Materialauswahl und Lebensdauer. Das Fraunhofer ISE untersucht das thermische Verhalten der Receiver in Fresnel-Kollektoren mit Computermodellen und Labortests. Damit unterstützen wir unsere Industriepartner von der technischen Auslegung bis hin zur Implementierung und Inbetriebnahme von Solarkraftwerken.

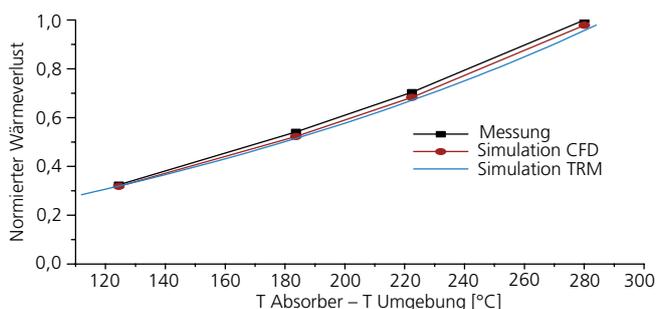
Felipe Cuevas, Anna Heimsath, Annie Hofer, Peter Nitz, Werner Platzer

Lineare Fresnel-Kollektoren (LFC) stellen eine kosteneffiziente Technologie zur Erzeugung von Prozesswärme und Elektrizität dar. Ihr Design erfordert eine spezielle Empfängereinheit (Receiver, Abb. 2), deren Wärmeverlust sich mit den Betriebsbedingungen ändert. In unserem Labortest bilden wir durch elektrische Heizeinheiten die Bedingungen im Feldeinsatz nach. Im stationären Betrieb entspricht der Energieverbrauch den Wärmeverlusten. Die am Sekundärspiegel auftreffende Strahlung erwärmt diesen, wodurch die Wärmebilanz des Receivers beeinflusst wird. Daher sind weitere Heizeinheiten über dem Sekundärspiegel angebracht. Simulationen erlauben die Variation von Parametern, die im Labor nicht oder nur mit hohem Aufwand variiert werden können. Dazu zählen variable Umgebungsbedingungen, die Receivergeometrie und verwendete Materialien. Zur Modellierung verwenden wir zum einen CFD, zum anderen haben wir ein vereinfachtes Modell (Thermal Resistance Model TRM) entwickelt. Unsere Simulationen validieren wir anhand von Messungen. Der Hauptunterschied

1 *Temperatursensoren auf einem Absorberrohr in einem Laboraufbau für thermische Tests an einem LFC-Receiver.*



2 *a) Konfigurationen von LFC-Receiver. Das Glashüllrohr im oberen Bild kann evakuiert sein. b) und c) Temperaturverteilung innerhalb eines LFC-Receiver, ermittelt mit CFD Simulationen.*



3 *Ein Vergleich von Ergebnissen aus Messungen des Wärmeverlusts und aus Simulationen zeigt eine gute Übereinstimmung.*

zwischen den Modellen sind Simulationszeit und Detaillierungsgrad. CFD-Simulationen sind sehr zeitaufwendig, liefern aber räumlich detaillierte Ergebnisse (Abb. 3). Mit unserem TRM können schnell Parameter variiert werden, womit es sich in Routinen zur Optimierung und in Sensitivitätsanalysen integrieren lässt. Die Ergebnisse unserer detaillierten Untersuchungen von LFC-Receiver erlauben ein besseres Verständnis und fließen in die Auswertung von Ertragsmessungen oder die Identifikation von Kollektorparametern mit ein.

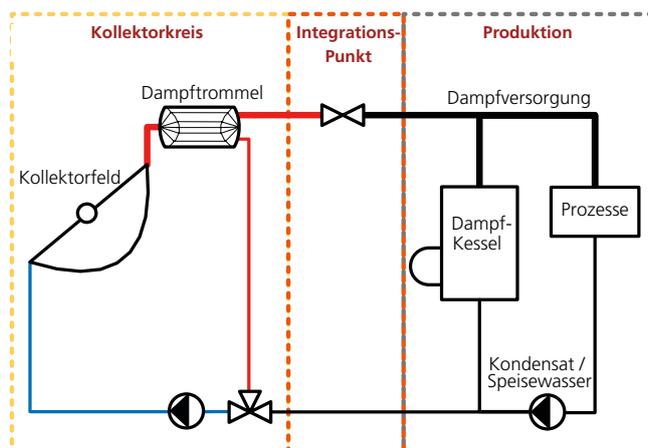


© Industrial Solar

SOLARE PROZESSWÄRME FÜR INDUSTRIELLE DAMPFNETZE IN TUNESIEN

Industrielle Prozesse werden häufig über Dampfnetze mit Wärme versorgt. Fokussierende solarthermische Kollektoren können direkt Dampf erzeugen und in diese Netze einspeisen. Dies hat den Vorteil, dass sich Änderungen an einzelnen Prozessen kaum auf das Solarsystem auswirken. Im Auftrag der GIZ Tunesien arbeiten wir im Projekt »DASTII (Diffusion des Applications Solaires Thermiques Innovantes dans l'Industrie Tunisienne)« an der Verbreitung solarthermischer Anlagen in der tunesischen Industrie. Wir haben Machbarkeitsstudien für solare Prozesswärmeanlagen erstellt, mit denen Emissionen von 250 t CO₂/Jahr eingespart werden sollen. Zusätzlich erarbeiten wir ein Monitoring-Konzept und führen Schulungen vor Ort durch.

Annabell Helmke, Stefan Heß, Anton Neuhäuser, Werner Platzer



2 Direkte solare Dampferzeugung mit einem fokussierenden Kollektor. Das Speisewasser zirkuliert kontinuierlich durch den Kollektor. Sind Temperatur und Druck des Dampfnetzes erreicht, stellt sich im Absorberrohr eine Zwei-Phasen-Strömung ein. In der Dampftrommel wird der Dampf-Anteil abgeschieden und anschließend über ein Ventil parallel zum Kessel ins Dampfnetz eingespeist.

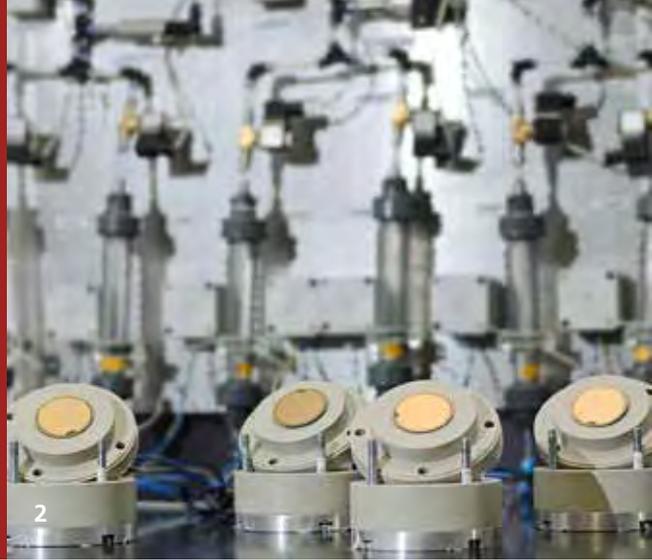
1 Linear konzentrierender Fresnel-Kollektor.

Im Projekt »DASTII« haben wir eine Methodik zur Auswahl geeigneter Betriebe für solare Prozesswärme entwickelt. Damit haben wir für mehrere Produktionsstätten in Tunesien das technische und ökonomische Potenzial solarer Dampferzeugung untersucht. Es wurde jeweils auch das Potenzial zur Steigerung der Energieeffizienz berücksichtigt. Wir haben die Systeme in unserer Simulationsplattform »ColSim« abgebildet und dort die Dampfprofile realitätsnah modelliert. Ziel der Studie war, in tunesischen Betrieben durch den Einsatz solarer Prozesswärme Emissionen von 250 t CO₂ pro Jahr einzusparen. Dies entspricht abhängig von Brennstoff- und Kessel-Wirkungsgrad einer Wärmemenge von ca. 800 bis 1100 MWh/a. Die Ergebnisse zeigen, dass sich mit einem Fresnel-Kollektor in Tunesien ohne Förderung solare Wärmegestehungskosten von fünf bis sieben Eurocent pro Kilowattstunde erreichen lassen. Hierbei haben wir realistische Systemkosten und eine Eigenfinanzierung der Anlage angenommen.

Auf Basis unserer Machbarkeitsstudien werden nun Betriebe ausgewählt, in denen von der GIZ geförderte Solaranlagen installiert werden sollen. Wir werden die Ausschreibung und Installation der Anlagen begleiten, das Monitoring fachlich überwachen und die Ergebnisse über einen Zeitraum von zwei Jahren auswerten. Parallel dazu führen wir vor Ort Schulungen für Akteure aus Ministerien und Forschung durch und liefern Schulungsunterlagen für Planer und Techniker.

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

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



WASSERAUFBEREITUNG MIT SOLAR BETRIEBENEN MEMBRANVERFAHREN

Unsere Kompetenzen in der Verbindung von Solar- und Wassertechnologie stellen ein wichtiges Alleinstellungsmerkmal am Fraunhofer ISE dar. Wir forschen im Bereich dynamisch betriebene Umkehrosmose zur Meerwasserentsalzung mit einer direkten PV-Stromversorgung. Des Weiteren liegt unser Fokus auf der Membrandestillation als Membranverfahren, die das Temperaturniveau von solarthermischen Kollektoren oder Abwärme von Kraftwerksprozessen, Geothermie oder Dieselaggregaten effizient nutzen kann. Unsere Kompetenzen im Bereich Ultrafiltration, Umkehrosmose und Membrandestillation in Verbindung mit einer solaren Energieversorgung konnten wir zuletzt in einer Studie für verschiedene Inselstaaten anwenden.

Julian-Niclas Anhalt, David Düver, Joachim Koschikowski, **Joachim Went**, Daniel Winter, Werner Platzer

Bei der Ultrafiltration (UF) streben wir einen Betrieb ohne chemische Reinigung des Wassers an. Hierzu werden geeignete Vorbehandlungsstufen, intelligente Betriebsführungen und Reinigungsprozeduren untersucht. Aktuell haben wir ein vollständig photovoltaisch betriebenes UF-System mit einer in situ Chlorproduktion kombiniert, um das aufbereitete Wasser vor einer Nachverkeimung zu schützen (Abb. 1).

Im Bereich der Umkehrosmose (RO) zur Meer- und Brackwasserentsalzung arbeiten wir an der Implementierung einer dynamischen Betriebsführung, bei der sich die Leistungsaufnahme des RO-Prozesses an die zur Verfügung stehende Leistung aus der photovoltaischen Energieversorgung optimal anpasst. Um das Gesamtkonzept möglichst einfach und robust zu halten,

1 *PV-betriebenes Ultrafiltrationssystem mit integriertem Nachverkeimungsschutz, installiert in einem Anhänger. Energieversorgung: 2,2 kW_p PV-Anlage und 130 Ah bei 48 VDC Batteriesystem; Filtrationsfluss: 1,5–2 m³/h bei Förderhöhen bis 50 m (ca. 20 m³/d).*

2 *Teststand zur automatisierten Vermessung des Wasser-Eintrittsdrucks hydrophober, poröser Membranen wie sie für die Membrandestillation verwendet werden.*

haben wir hierfür einen eigens entwickelten Pumpentyp zur Energierückgewinnung patentiert und in diesem Jahr erstmals realisiert. 2014 konnten wir eine vollständig automatisierte Anlage in Betrieb nehmen, bei der ein PV-Generator emuliert wird.

Im Bereich der Membrandestillation (MD) bieten wir von der Membrancharakterisierung, der Systemsimulation, der Modulkonstruktion bis hin zu kompletten solar betriebenen MD-Systemen die gesamte Bandbreite der Entwicklungsschritte an und können dieses Know-how weltweit zielgerichtet für Entwicklungen einsetzen. MD-Trennverfahren aus verschiedensten Industriebereichen werden immer wichtiger für unsere Entwicklungsaufgaben. In diesem Jahr haben wir einen Laborteststand (Abb. 2) in Betrieb genommen, der es erlaubt, MD-Membranen für unterschiedliche Stoffsysteme detailliert zu charakterisieren.

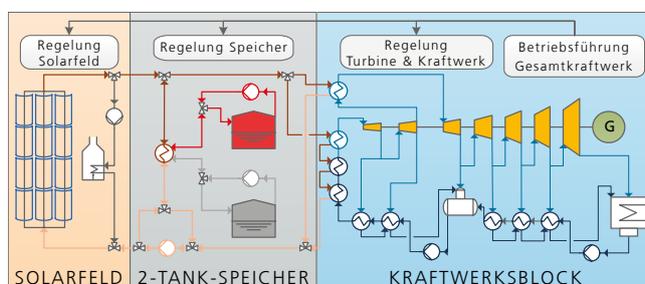


© RWE InnoSy

OPTIMIERUNG DER BETRIEBSFÜHRUNG VON SOLARTHERMISCHEN KRAFTWERKEN

Bei der Entwicklung, Auslegung und Optimierung von solarthermischen Kraftwerkskonzepten und den entsprechenden Komponenten sowie bei der Untersuchung von Betriebsstrategien für Solarfeld, Kraftwerksblock und Speichereinbindung, sind verlässliche Simulationsmodelle essenziell. Am Fraunhofer ISE werden diese in der Simulationsumgebung »ColSim-CSP« gebündelt. Modelle für Kollektoren, Speicher und thermische Entsalzungsanlagen werden fortlaufend erweitert und validiert. Die Vielzahl der verfügbaren Komponentenmodelle und die integrierte Stoffdatenbank machen »ColSim-CSP« zu einem leistungsfähigen, flexibel einsetzbaren Werkzeug, sowohl für schnelle Jahressimulationen als auch für zeitlich hoch aufgelöste Detailbetrachtungen des Tagesgangs, zur Abbildung von Transienten und zur Untersuchung des Betriebsverhaltens solarthermischer Kraftwerke.

Raymond Branke, Tom Fluri, Annie Hofer, Anton Neuhäuser, Bernhard Seubert, Alexander Vogel, Verena Zipf, Werner Platzer



2 Schema des Parabolrinnenkraftwerks ANDASOL 3 mit dem in der Simulationsumgebung »ColSim-CSP« abgebildeten Detaillierungsgrad: Die dargestellten Komponenten des Kraftwerks und die übergeordneten Regelungsalgorithmen entsprechen jeweils eigenständigen mathematisch-physikalischen Modellen in »ColSim-CSP«.

1 Das Parabolrinnenkraftwerk ANDASOL 3, Guadix, Spanien: Vorne links im Bild der Salzsammel-Speicher, dahinter der Kraftwerksblock, rechts das Solarfeld.

Die objektorientierte Simulationsumgebung »ColSim« wird als Werkzeug für den Entwurf und die Analyse von regelungstechnischen Fragestellungen im Umfeld solarer Versorgungssysteme verwendet und kontinuierlich weiterentwickelt. Wir verfügen damit über eine hochleistungsfähige modulare Simulationsumgebung, mit der Forschungs- und Entwicklungsfragestellungen in verschiedenen Bereichen solarthermischer und anderer energietechnischer Anwendungen beantwortet werden.

Die umfangreichsten Erweiterungen der Simulationsumgebung erfolgten in den letzten Jahren im Bereich der konzentrierenden Solarthermie, im Entwicklungszweig »ColSim-CSP«. Er beinhaltet diverse validierte Komponenten- und Systemmodelle sowie Stoffdatenbanken zur Simulation von CSP-Kraftwerken (Concentrating Solar Thermal Power) mit unterschiedlichen Kollektor-Technologien. Wahlweise können thermische Speicher, Systeme zur Bereitstellung von Prozesswärme / -kälte sowie thermische Entsalzungsanlagen integriert werden. Aktuell wird die Komponenten-Bibliothek von »ColSim-CSP« mit realen Betriebsdaten eines Parabolrinnenkraftwerks (Abb. 2) validiert, um die vorhandenen Modelle zur Steuerung und Regelung des Kraftwerks zu verfeinern, sowie um Optimierungspotenziale der Betriebsführung in diesem und vergleichbaren solarthermischen Kraftwerken aufzuzeigen. Die Kombination mit Kostenmodellen für die techno-ökonomische Optimierung erfordert die enge Zusammenarbeit mit den Kunden. Im Normalfall werden die Simulationen und Optimierungen am Fraunhofer ISE durchgeführt und ausgewertet. Es besteht aber auch die Möglichkeit, kundenspezifische Simulationswerkzeuge abzuleiten, die dann beim Kunden installiert und ausgeführt werden.



KORROSION ALS BELASTUNGSFAKTOR FÜR MATERIALIEN UND KOLLEKTOREN

Die atmosphärische Korrosivität gehört zu den wichtigsten Belastungsfaktoren für Solarkollektoren. Besonders Absorber und Reflektoren sind hiervon stark betroffen. Deshalb sind Kenntnisse über die Aggressivität der Atmosphäre hinsichtlich ihrer Korrosivität für die Entwicklung neuer, innovativer Komponenten der Solarkollektoren unverzichtbar. Durch Messung und Kartierung der atmosphärischen Korrosivität haben wir wichtige Erkenntnisse zur Klassifizierung regionaler Klimate gewonnen. Diese dienen als Basis für die Entwicklung einer realitätsnahen Prüfprozedur für beschleunigte Alterungsuntersuchungen bezüglich Korrosivität und Salzgehalt in der Atmosphäre sowie für die Spezifikation von optimalen Korrosionsschutzsystemen für Solarkollektoren.

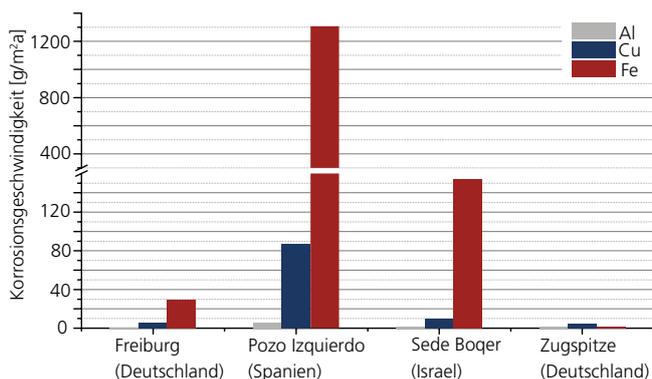
Elisabeth Klimm, Michael Köhl, **Karolina Slamova**, Karl-Anders Weiß, Werner Platzer

Die Klimate werden nach ihrer Korrosivität in vier grundlegende Beanspruchungsstufen eingeteilt: Land-, Stadt-, Industrie- und Meeresklima, wobei das letzte das höchste Korrosionsrisiko aufweist. Aufgrund unterschiedlicher lokaler Bedingungen (Luftfeuchtigkeit und Niederschlag) oder spezifischer Luftschadstoffe (insbesondere SO_2 und NO_x) auch innerhalb einer Kategorie herrschen zusätzlich erhebliche Differenzen in der Korrosivität der Atmosphäre. Um genauere Informationen über die korrosive Beanspruchung in den Anwendungsregionen der Solarthermie zu ermitteln, verfolgen wir zwei verschiedene Ansätze. Zum einen wurde die atmosphärische Korrosivität durch die Exposition von metallischen Gebrauchsnormen (Abb. 1) von Aluminium, Karbonstahl, Zink und Kupfer an 25 Standorten weltweit ermittelt (Abb. 3). Zum anderen wurde das Korrosivitätsrisiko der Atmosphäre global mit dem Geographischen Informationssystem (GIS) modelliert und klassifiziert (Abb. 2). Ziel ist, mit unseren

1 Exposition von metallischen Gebrauchsnormen zur Messung von atmosphärischer Korrosivität am Freibewitterungsstandort Gran Canaria des Fraunhofer ISE.



2 Räumliche Klassifikation des Korrosivitätsrisikos auf der Weltkarte.



3 Vergleich der Massenverluste durch Korrosion für die Metalle Al, Cu und Fe nach einem Jahr Exposition an vier Freibewitterungsstandorten des Fraunhofer ISE.

Ergebnissen die Materialoptimierung für die unterschiedlichen Einsatzgebiete von solarthermischen Kollektoren zu unterstützen.

Diese Arbeit ist Teil des Projekts »SpeedColl« und wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und den teilnehmenden Industriepartnern unterstützt.

ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE



Über 40 % des Endenergiebedarfs in Deutschland entfallen auf den Gebäudesektor. Ähnliche Zahlen gelten in Europa und in den meisten industrialisierten Ländern. Der überwiegende Anteil an Energie wird dabei für ein angenehmes Raumklima sowie für Warmwasserbereitung und künstliche Beleuchtung benötigt. Hierfür werden heute überwiegend fossile Brennstoffe verwendet. Dem Gebäudesektor kommt insofern eine zentrale Rolle bei der Erreichung von Klimaschutzziele zu.

Unsere Arbeiten im Geschäftsfeld Energieeffiziente Gebäude umfassen alle wesentlichen Bereiche der Energieeffizienz und der Nutzung erneuerbarer Energien in Gebäuden – sei es für Wohnungsbauten oder Nichtwohngebäude, sei es für Neubauten oder Bestandsgebäude.

Die Entwicklung von ganzheitlichen Energiekonzepten für Gebäude unter Einbeziehung von Effizienzmaßnahmen im Bereich der Gebäudehülle sowie einer optimierten Anlagentechnik garantieren maximalen Raumkomfort bei zugleich geringen Kosten und dem minimierten Einsatz konventioneller Energien. Mit unserer langjährigen Erfahrung und einer Vielzahl leistungsfähiger Rechner-gestützter Werkzeuge können wir die Erstellung von Energiekonzepten für Gebäude, Gewerbetriebe und Wohnquartiere unterstützen.

Entscheidend für den Energiebedarf von Gebäuden ist vor allem die Gebäudehülle. Zukunftsweisende Konzepte für Gebäudefassaden verfügen über mehr als die klassischen Funktionen des Wetter- und Wärmeschutzes. Unsere Arbeiten in den Themenfeldern Fassaden und Fenster sowie der Lichttechnik adressieren zunehmend die Integration aktiver Solarkomponenten – Photovoltaik, Solarthermie – in die Fassade wie auch die Integration weiterer Funktionen wie Lüftung und Heizung oder Kühlung. Daneben spielt weiterhin die Sicherstellung eines hohen visuellen Komforts bei zugleich möglichst hoher Tageslichtnutzung eine wichtige Rolle.

Smart Home Technologien liefern eine hohe Transparenz zum Gebäudebetrieb, Energieverbrauch und den Betriebskosten. Zugleich eröffnen sie die Möglichkeit, nutzerfreundlich in den Gebäudebetrieb einzugreifen. Zukunftsfähige Konzepte integrieren zudem Möglichkeiten eines kostenoptimierten Gebäudebetriebs unter Einbeziehung erneuerbarer Energien und von Energiespeichern und können auf Netzanforderungen reagieren. Wir entwickeln neue Hard- und Softwarelösungen und unterstützen bei der Technologieentwicklung und -implementierung. Die Betriebsführung von Gebäuden ist ein eigenständiger Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkt. Unsere Arbeiten konzentrieren sich hier auf die Entwicklung von automatisierten Verfahren für die Visualisierung und

Analyse von Monitoringdaten, die es ermöglichen, Fehler im Gebäudebetrieb frühzeitig zu erkennen, Einsparpotenziale aufzudecken und die Wartung der gebäudetechnischen Anlagen zu unterstützen.

Die Sicherstellung eines hohen Raumkomforts in Verbindung mit dem politischen Ziel eines klimaneutralen Gebäudebestands erfordert neben dem baulichen Wärmeschutz leistungsfähige Versorgungstechniken mit niedrigen spezifischen CO₂-Emissionen. Hier spielen elektrische und thermisch angetriebene Wärmepumpen eine herausragende Rolle. Unsere Arbeiten reichen dabei von grundlagenorientierten Fragestellungen zur Effizienzerhöhung und Kostenreduktion bis hin zur Begleitung der Markterschließung durch umfassende Feldtests. Gerade im Bereich der Wärmeübertragung lassen sich erhebliche Kosteneinsparungs- und Effizienzsteigerungspotenziale erschließen, weshalb wir die Wärmeübertragung in gebäudetechnischen Anlagen zu einem eigenen Themenschwerpunkt entwickelt haben.

Verfahren der Kühlung und Klimatisierung von Gebäuden spielen besonders in Nicht-Wohngebäuden – und in wärmeren Klimazonen auch in Wohngebäuden – eine wichtige Rolle. Wir fokussieren in unseren Arbeiten hocheffiziente Verfahren unter Einbeziehung von Wärmesenken in der Umwelt und wir entwickeln neuartige thermisch angetriebene Entfeuchtungsverfahren speziell für feuchte Klimazonen.

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	125
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	102
Zeitschriften- und Buchbeiträge	38
Vorträge und Konferenzbeiträge	45
Neu erteilte Patente	2

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



OFREE-Prüfstand (Outdoor test Facility for Real-size building Envelope Elements) für Fassadenelemente bis zu 4 m x 3,77 m (hier ohne Fassadenelement). Gut sichtbar ist die schwarze Kalorimeteroberfläche sowie die I-Träger des Trackers, auf denen das rechteckige Kalorimeter befestigt ist. Die Bewicklungseinheit für den definierten äußeren Wärmeübergangskoeffizienten wird ebenfalls erst nach dem Fassadenelement montiert.

ANSPRECHPARTNER

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



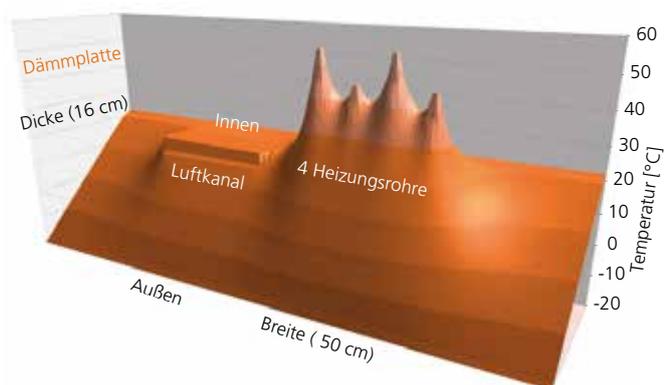
VORFERTIGUNG MEHRFACH FUNKTIONALER FASSADEN

Ziel der Bundesregierung ist, bis zum Jahr 2050 einen nahezu klimaneutralen Gebäudebestand zu etablieren. Dazu müssen der Energieverbrauch der Gebäude gesenkt und gleichzeitig der Ausbau erneuerbarer Energien zur Wärmenutzung vorangetrieben werden. Die Verbindung der Sanierung der thermischen Gebäudehülle mit der Verbesserung der haustechnischen Anlagen stellt hier einen interessanten Lösungsansatz dar, bei dem es allerdings noch an flexiblen und preiswerten Konzepten mangelt. Im Rahmen verschiedener Projekte werden am Fraunhofer ISE vorgefertigte Fassadensysteme entwickelt, die es ermöglichen, Lüftungs-, Heizungs- und Sanitärsysteme systemisch zusammen mit der Wärmedämmung der Fassade einzubauen. Ziel ist, die Medien über entsprechende Fensterelemente durch die bestehenden Fensteröffnungen in das Gebäudeinnere zu führen.

Fabien Coydon, **Arnulf Dinkel**, Sebastian Herkel, Hans-Martin Henning

Speziell entwickelte integrierte Elemente ermöglichen die flexible Verlegung von Dämmung, Heizung, Lüftung, Strom und ICT. Diese Fassadenelemente können auch später mit zusätzlichen Funktionen nachgerüstet werden. Die bestehende Haustechnik kann sukzessive durch neue Komponenten ersetzt werden, ohne dass grosse Eingriffe in der Gebäudesubstanz und Nutzerstörungen nötig werden. Dies ermöglicht den schrittweisen Übergang zu LowEx-Systemen in Bestandsgebäuden. Um die Attraktivität zu erhöhen, zielen wir auf standardisierte Systeme mit verschiedenen Upgrade- und Individualisierungsmöglichkeiten für alle entwickelten Systeme. Jeder Teil – Fenster-, Fassaden-, Klimatechnik und Solaranlage – kann unabhängig voneinander und in Kombination mit traditionellen Systemen montiert werden. Dadurch wird eine hohe individuelle Freiheit für Kunden und

- 1 Polystyrol Wärmedämmplatte mit integrierten Kanal- und Rohrführungen für ein Wärmedämmverbundsystem.
- 2 Lüftungs-Kanalführung in der Fassade eines Mehrfamilienhauses, vorgefertigte Fenster und Dämmelemente im Wärmedämmverbund-System.



- 3 Temperaturverlauf innerhalb der Dämmebene von Lüftungs- und Heizungsrohren in der Dämmebene.

Produzenten bei der Auswahl der Module sowie eine Erweiterung je nach finanziellen Möglichkeiten erreicht. Im ersten Entwicklungsschritt wurden verschiedene Dämmsysteme mit unterschiedlichen Geometrien entwickelt. Erste Prototypen (Abb. 1) mit integrierter Kanalführung erfüllen die spezifizierten Vorgaben. Die Simulationen (Abb. 3) unterschiedlicher fassadenintegrierter Lüftungssysteme und die Vermessung eines Systems an einem Demonstratorgebäude führte zur optimierten Systemauslegung für Dämmung und Lüftung mit minimierten Energieverlusten. Im Projekt »RetroKit« wird dieser Ansatz an Demonstrationsprojekten mit Mehrfamilienhäusern in verschiedenen Klimazonen übertragen.

Das Projekt wird von der EU unterstützt.

www.retrokitproject.eu



VAKUUMISOLATIONSGLAS: FENSTER MIT SEHR NIEDRIGEM U-WERT

Noch immer stellen Fenster beim Wärmeschutz von Gebäuden eine thermische Schwachstelle dar. In Skandinavien werden aus diesem Grund schon Fenster mit Vierfachverglasung verbaut. Mit steigender Scheibenzahl erhöht sich jedoch neben dem Gewicht auch die Systemdicke (> 40 mm) der Fenster. Dem gegenüber steht das Vakuumisolationsglas (VIG), bestehend aus dem Verbund von zwei Glasscheiben mit einem evakuierten Scheibenzwischenraum. Die Wärmedämmeigenschaften von VIG-Systemen sind mit denen der Vierfachverglasung vergleichbar ($U_g \leq 0,5$ W/m²K). Realisiert wird VIG durch einen gasdichten und flexiblen Randverbund, wobei die Kernkompetenzen des Fraunhofer ISE in der Beschichtung der einzelnen Komponenten und im Vakuumlaserschweißprozess liegen.

Samuel Beisel, Wolfgang Graf, Thomas Kroyer, Werner Platzer

1 Prototyp eines Vakuumglases mit 0,5 mm dicken Abstandhaltern in einem Raster von 3 cm. Die Abstandhalter sind kaum sichtbar. Die Gesamttiefe der Verglasung beträgt 9 mm (Rahmen ca. 20 mm) und das Gewicht ist vergleichbar mit dem Gewicht eines Standard-Zweischeibenfensters. Derzeit sind Fenster mit einer Abmessung von 1 m x 1 m am Fraunhofer ISE in der Entwicklung.

Ziel des Vorhabens »VIG-S« ist die Entwicklung der Prozesse für die Produktion von Vakuumisolationsglas(VIG)-Systemen. Dafür werden alle erforderlichen Prozessschritte untersucht und optimiert. Der angestrebte U_g -Wert von 0,5 W/m²K wird nur erreicht, wenn im Scheibenzwischenraum ein maximaler Druck von $< 1 \times 10^{-3}$ mbar herrscht. Dafür ist ein gasdichter und flexibler Randverbund notwendig, der sowohl die Dichtigkeit über die gesamte Laufzeit gewährleistet, als auch den thermisch bedingten Ausdehnungen der Glasscheiben standhält. Die Umsetzung dieses Randverbunds stellt die größte Herausforderung dar und ist somit der Schwerpunkt dieses Vorhabens. Realisiert wird der Randverbund durch einen angepassten Glas / Metall-Verbund. Glas- und Metallsubstrate werden mit einem lötfähigen Schichtsystem durch Magnetronspütern beschichtet und anschließend im Weichlotverfahren verlötet. Pro Fensterscheibe ergibt dies ein Halb-VIG. Zwei dieser Halb-VIG werden im abschließenden Laserschweiß-Verfahren in Vakuum zu einem kompletten VIG gefertigt. Um mechanischen Kontakt der beiden Glasscheiben durch den Atmosphärendruck zu verhindern, werden vor dem Laserschweißprozess Abstandhalter in den Scheibenzwischenraum eingesetzt. Die Abstandhalter werden in Größe, Form und Anordnung so gewählt, dass sie beim fertigen Produkt kaum optische Einschränkungen verursachen (Abb. 1).

Das Projekt »VIG-S« wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützt.

www.vig-info.de



OUTDOOR-VERMESSUNG AKTIVER FASSADENELEMENTE IN ORIGINALGRÖSSE

Bauwerksintegrierte Solarsysteme (BISS) nutzen die Sonne, um den Energiebedarf von Gebäuden anteilig oder sogar vollständig zu decken und so zu einer Minimierung des Verbrauchs an nicht-regenerativer Energie zu führen. Bei Nichtwohngebäuden mit großer Fassadenfläche werden für die Fassade Elemente vorgefertigt, die z. B. 3,5 m hoch und 1,5 m breit sein können. Auf der Baustelle werden diese Elemente dann nacheinander montiert. Der neue OFREE-Prüfstand (Outdoor test Facility for Real-size building Envelope Elements) ermöglicht die Vermessung solcher Fassadenelemente, sowohl hinsichtlich des Energiestroms von der Fassade nach innen als auch der photovoltaischen und solarthermischen Erträge.

Ulrich Amann, Paolo Di Lauro, Sven Fahr, Johannes Hanek, Korbinian Kramer, Tilmann Kuhn, **Christoph Maurer**, Hans-Martin Henning

Der neue Außen-Prüfstand (OFREE) kann Fassadenelemente bis zu einer Höhe von 3,77 m und einer Breite von 4 m vermessen, wodurch Original-Fassadenelemente verwendet werden können. Ein weiterer Vorteil des OFREE ist die Exposition des Prüflings mit natürlichem Sonnenlicht. Im Labor lässt sich keine quasi-homogene quasi-parallele Bestrahlung einer größeren Fläche realisieren. Dies ist aber besonders für winkel-selektive Fassadenelemente wichtig. Mit dem neuen Prüfstand können somit die Werte für verschiedene Einfallswinkel sehr präzise, ohne störende divergente Strahlen vermessen werden.

Basis des neuen Prüfstands ist eine Sonnenstandsnachführungseinrichtung, auch »Tracker« genannt. Sie ist so stabil ausgelegt, dass Fassadenelemente bis zu einem Gewicht von 1,5 t vermessen werden können. Der Tracker kann unterschiedliche Winkel zur Sonneneinstrahlung anfahren und so viele verschiedene in der Realität auftretende Situationen

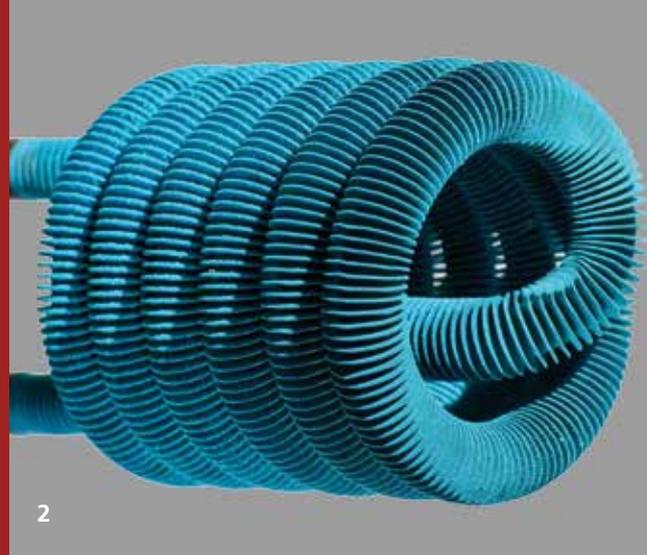
¹ *OFREE-Prüfstand (Outdoor test Facility for Real-size building Envelope Elements) ohne Fassadenelement. Gut sichtbar ist die schwarze Kalorimeteroberfläche sowie die I-Träger des Trackers, auf denen das rechteckige Kalorimeter befestigt ist. Die Bewindungs-einheit für den definierten äußeren Wärmeübergangskoeffizienten wird erst nach dem Fassadenelement montiert.*

nachbilden. Neben Fassadenelementen können natürlich auch Dachelemente vermessen werden. Auf dem Tracker ist ein Kalorimeter montiert. Dieses ersetzt den Innenraum und kann präzise auf eine Temperatur zwischen 15 °C und 70 °C eingestellt werden. Das Kalorimeter hat eine schwarze Oberfläche, um Solarstrahlung möglichst vollständig zu absorbieren, die durch das Fassadenelement transmittiert wird. Zusätzlich sind im Kalorimeter Wärmeflussplatten eingebaut, um den Energiestrom von der Fassade zum Kalorimeter zu messen. Damit können die Energieströme an komplexen multifunktionalen Fassaden unter realen Bedingungen bilanziert werden. Abb. 1 zeigt ein Foto des Prüfstands.

Der OFREE-Prüfstand kann bauwerksintegrierte Photovoltaik (BIPV), Solarthermie (BIST) und bauwerksintegrierte photovoltaisch-thermische Module (BIPVT) ebenso vermessen wie passive Fassadenelemente, transparente ebenso wie opake. Neben der quasi-stationären Messung des g-Werts (Gesamtenergiedurchlassgrad; Solar Heat Gain Coefficient SHGC) können durch dynamische Messungen auch sehr gut detaillierte physikalische Modelle validiert werden, mit denen das Verhalten der Fassade für andere Orte, Einbausituationen und Anwendungen simuliert werden kann.

Das Vorhaben wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.

www.ise.fraunhofer.de/de/servicebereiche/testlab-solar-facades



SORPTIONSMATERIALIEN UND BESCHICHTUNGEN FÜR ADSORPTIONSPROZESSE

Adsorptionsprozesse an porösen Materialien sind heute das Kernelement in zahlreichen technischen Verfahren. Dazu zählen z. B. die Gasspeicherung und -trennung, heterogene Katalyse und insbesondere auch thermisch angetriebene Wärmepumpen und Kältemaschinen. Im Mittelpunkt unserer Forschung steht die Verwendung der neuen Materialklasse der metallorganischen Gerüstverbindungen (MOFs) in diesen Wärmewandlungsprozessen zur ressourceneffizienten Erzeugung von Wärme und Kälte. Es ist uns gelungen, verschiedene wasserstabile Verbindungen aus der Klasse der MOFs zu synthetisieren und zwei komplementäre Beschichtungsverfahren zu entwickeln, um diese auf Wärmeübertragerstrukturen aufzubringen. Hierbei haben wir bereits einen vorindustriellen Maßstab erreicht.

Phillip Bendix, Dominik Fröhlich, **Stefan Henninger**, Felix Jeremias, Harry Kummer, Gunther Munz, Peter Schossig, Hans-Martin Henning

Aktuell werden in Adsorptionswärmepumpen Silikagele oder Zeolithe eingesetzt. Die neuartigen, kristallinen Verbindungen aus der Klasse der metallorganischen Gerüstverbindungen (metal organic frameworks, MOFs) basieren auf einem einzigartigen chemischen »Baukastensystem« und vereinen eine chemische Variabilität mit teils enorm hohen inneren Oberflächen (SBET > 4000 m²/g). Leider zeigten die meisten Vertreter dieser Klasse bisher eine geringe Stabilität gegen Wasserdampf.

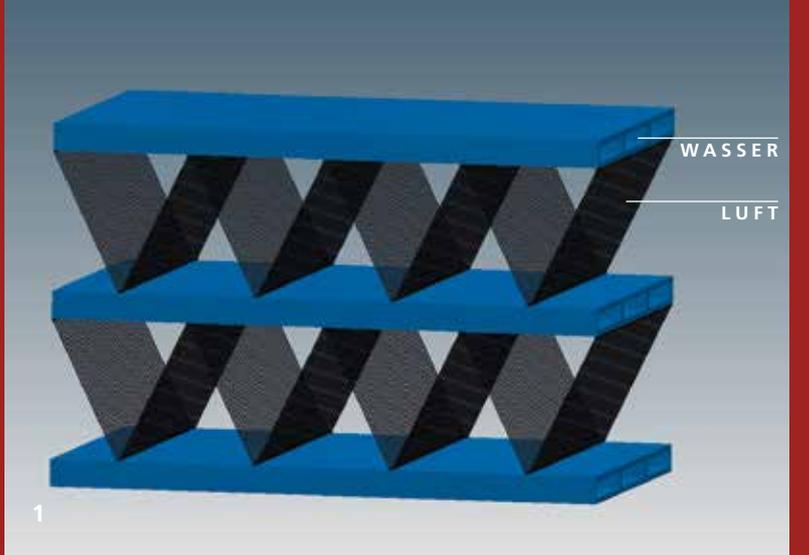
In den letzten Jahren konnten wir vielversprechende Verbindungen identifizieren und synthetisieren, die sich durch eine hohe Wasserdampfkapazität (bis zu 1,4 g/g) sowie eine dauerhafte Stabilität (mehr als 5000 Adsorptionszyklen) auszeichnen. Ebenso konnten wir erfolgreich den Synthesemaßstab erhöhen.

1 *Binderbasierte Beschichtung einer dreidimensionalen Trägerstruktur.*

2 *Mit Direktaufkristallisationsverfahren beschichtetes Kupfer-Rippenrohr, wie es z. B. in Adsorptionskältemaschinen zur Anwendung kommt.*

Mit diesen neuen, hochleistungsfähigen Adsorbentien erhöhen sich gleichzeitig die Anforderungen an den Stoff- und Wärmetransport. Besonders bei zyklisch betriebenen Anwendungen wie Adsorptionswärmepumpen und -kältemaschinen muss sowohl eine gute Zugänglichkeit des Kältemittels (z. B. Wasser, Alkohol) an den Oberflächen gewährleistet sein, als auch eine hohe thermische Ankopplung erreicht werden, um die frei werdende Wärme schnell abführen zu können. Wir konnten zwei komplementäre Beschichtungsverfahren – indirekt und direkt – entwickeln, die diese Voraussetzungen erfüllen, und die zum Patent angemeldet wurden.

Bei der indirekten Beschichtung wird das Sorptionsmaterial zusammen mit einem Haftvermittler (Binder) auf die Trägerstruktur aufgebracht. Hier ist die Flexibilität bezüglich des Adsorptionsmaterials und des Trägermaterials von Vorteil. So können das Adsorptionsmaterial, das Material des Wärmeübertragers und dessen Geometrie bestmöglich an die Anforderungen des Prozesses angepasst werden. Wir konnten bereits Beschichtungen auf verschiedenen Metallen und Keramiken realisieren. Zusätzlich kann eine breite Palette von Adsorbentien wie Silikagele, Zeolithe, Silica-Aluminophosphate (SAPOs) oder auch MOFs verwendet werden. Bei dem Direktaufkristallisationsverfahren wird die funktionale, bis zu 200 µm dicke Schicht aus einer Lösung der MOF-»Bausteine« direkt auf der zu beschichtenden Oberfläche realisiert. Der thermische Kontaktwiderstand zwischen Beschichtung und Substrat entspricht demjenigen einer klassischen Lötverbindung. Wir konnten nachweisen, dass die Beschichtung optimal zugänglich ist bei gleichzeitig sehr hoher mechanischer Stabilität.



EFFIZIENTE WÄRMEÜBERTRAGUNG MIT METALLGEWEBESTRUKTUREN

Wärmeübertrager, die Metalldrahtgewebe als Übertragungsstruktur nutzen, zeigen in ersten Untersuchungen ein großes Potenzial zur Massenreduktion und Energieeinsparung. Im Verbundprojekt »EffiMet«, das über das »KMU-innovativ-Programm« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wurde, konnten gemeinsam mit den Partnern Visiotex GmbH, Hattler & Sohn GmbH und dem Fraunhofer IFAM Dresden die theoretischen Hintergründe untersucht sowie Wege zur technischen Umsetzung identifiziert und an exemplarischen Bauteilen umgesetzt werden. Die Ergebnisse an einem der umgesetzten Bauteile zeigen, dass bei gleicher energetischer Effizienz ca. 50 % Material in der Oberflächenvergrößerung eingespart werden können. Korrespondierend erhöht sich bei gleichem Materialaufwand die Energieeffizienz.

Hannes Fugmann, Eric Laurenz, Björn Nienborg,
Lena Schnabel, Hans-Martin Henning

Verantwortlich für das große Potenzial zur Materialeinsparung ist die Umströmung von einzelnen dünnen Drähten. Im Vergleich mit Oberflächen aus dünnen Blechen (Lamellen) können Drähte die doppelte Oberfläche bei gleichem Materialaufwand zur Verfügung stellen. Ist die Lamellendicke gleich dem Drahtdurchmesser, kann so die Hälfte der Masse gespart werden. Zusätzlich führt die Umströmung von Drähten zu vergleichsweise hohen Wärmeübergangskoeffizienten, so dass bei gleicher Oberfläche deutlich mehr Wärme übertragen werden kann.

Der Wärmeübergang ist auch bereits bei kleinen Strömungsgeschwindigkeiten vergleichsweise hoch, so dass sich geringe Druckverluste erzielen lassen. Um neben der Materialersparnis auch eine hohe energetische Effizienz (Übertragungsfähigkeit in Relation zur Pump- oder Ventilatorleistung) zu realisieren,

1 Der Weg vom Design zur gefertigten Wärmeübertragerstruktur im »EffiMet«-Projekt. Links ist ein schematischer Designentwurf dargestellt. Rechts ist ein Ausschnitt eines Luft-Wasser-Wärmeübertragers zu sehen, bei dem zwischen den wasserdurchströmten Flachrohren gewebebasierte Lamellen eingelötet wurden. Diese können unterschiedlich dicht gestaltet werden. Die Lotbeschichtung von Drähten und Rohren wurde durch die Fa. Hattler realisiert, die Gewebe durch Visiotex GmbH gefertigt.

sind Bauformen erforderlich, die an den Drahtstrukturen nur geringe Strömungsgeschwindigkeiten zulassen. Ein Ansatz für eine solche Bauform, bei der die Fläche der durchströmten Gewebestruktur deutlich größer ist als die Anströmfläche des Wärmeübertragers, wird derzeit im »SolaRück«-Projekt untersucht. In diesem Verbundvorhaben entwickeln drei Industriepartner Rückkühler im Leistungsbereich <50 kW, die gut an die Anforderungen der solarthermischen Kälteerzeugung angepasst sind. Am Fraunhofer ISE liegt der Fokus neben der Betriebsanalyse auf der Untersuchung neuer Wärmeübertragerbauformen, die eine deutliche Effizienzsteigerung erlauben.

Das Projekt »EffiMet« wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützt. Das Projekt »SolaRück« wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert.



MESSTECHNISCHE UNTERSUCHUNG VIELFÄLTIGER WÄRMEPUMPENLÖSUNGEN

Wärmepumpen stellen eine sehr vielversprechende Heiztechnik für die Umsetzung der Energiewende im Gebäudebereich dar. Dabei variieren die Technologien und Einsatzbereiche von Wärmepumpen stark. Je nach Gebäude – Wohngebäude, Bürogebäude oder Gewerbebau – sowie nach Randbedingungen und Anforderungen können Wärmepumpen zur Raumheizung, zur Trinkwassererwärmung oder auch zur Kühlung eingesetzt werden. Im Rahmen mehrerer Felduntersuchungen ermittelt das Fraunhofer ISE die reale Performance unterschiedlicher Technologien und Anwendungen, deckt Optimierungspotenziale auf und begleitet somit die Verbreitung und Qualitätssicherung einer Schlüsseltechnologie.

Constanze Bongs, Danny Günther, Doreen Kalz,
Marek Miara, Hans-Martin Henning

Das Projekt »WP Monitor PLUS« reiht sich in die bisherigen Messkampagnen zur Untersuchung der Effizienz von elektrischen Wärmepumpen zur Raumheizung und Trinkwassererwärmung in Einfamilienhäusern ein. In überwiegend neuen Gebäuden mit Niedertemperaturheizsystemen wurden besonders effiziente Außenluft- und Erdreich-Wärmepumpen bis Ende 2014 messtechnisch untersucht. Im Ergebnis werden Best-Practice-Lösungen ermittelt und mögliche Beiträge zur Energieeinsparung in diesem Anwendungsbereich aufgezeigt.

Erste Pilotanlagen gasbefeuerter Absorptionswärmepumpen werden im Rahmen des Projekts »Heat4U« untersucht. Die Technologie zeichnet sich auch bei hohen Vorlauftemperaturen durch eine hohe Effizienz aus und zielt daher auf den Ersatz

- 1 Gaswärmepumpe im Feldtest.
- 2 Beispiele für Gebäude mit elektrisch betriebenen Wärmepumpen im Feldtest.

von Heizungstechnik in bestehenden Wohngebäuden ab. Die außen aufgestellte Gaswärmepumpe mit einer Heizleistung von 18 kW (bei 50 °C im Vorlauf und 7 °C Lufttemperatur) nutzt Luft als Wärmequelle. Vier Feldanlagen wurden in Polen, Großbritannien, Deutschland und Frankreich aufgebaut und werden derzeit messtechnisch erfasst. Die Untersuchungen werden durch eine Laborvermessung und Systemsimulationen begleitet. Dieses Vorhaben wurde durch die Europäische Union gefördert.

Weiterhin wurden auf Basis der Messdaten aus mehrjährigen Feldtests die Energie- und Effizienzperformance sowie das Betriebsverhalten von 16 großen Wärmepumpenanlagen mit einem Leistungsbereich von 40 bis 322 kW_{therm} detailliert bewertet. Für die Wärmepumpenanlagen (Wärmepumpe mit Verdichter und Primärpumpe) wurden Jahresarbeitszahlen von 2,3 bis 6,1 kWh_{therm}/kWh_{el} (Quelle Erdreich) bzw. 2,9 bis 4,3 kWh_{therm}/kWh_{el} (Quelle Grundwasser) ermittelt.

www.wp-monitor.ise.fraunhofer.de
www.heat4u.eu



2

POTENZIAL GENUTZT – ELEKTROMOBILITÄT IM ENERGIEPLUSHAUS

Ökologisch, energieeffizient und smart ist das Haus der Zukunft. Die smarte Energiesteuerung schätzt die Stromerzeugung der eigenen PV-Anlage und den Verbrauch im Haushalt auf Sicht der nächsten Stunden ab und entwickelt z. B. Strategien zur Erhöhung des Eigenstromverbrauchs. Dafür werden dann bestimmte Verbraucher oder Speicher flexibel betrieben, koordiniert von der zentralen Energiesteuerung. Besonders gut eignen sich hierfür Wärmepumpensysteme und Elektrofahrzeuge, die nicht immer sofort voll geladen werden müssen. Im Projekt »Fellbach ZEROplus« wird ein solches Heimenenergiemanagementsystem entwickelt und von den Bewohnern der Energieplushäuser in der Praxis getestet.

Robert Kohrs, **Marco Mittelsdorf**, Dominik Noeren, Günther Ebert, Hans-Martin Henning

Stecker rein und laden – was beim Smartphone funktioniert, reicht zum intelligenten Laden von Elektrofahrzeugen nicht aus. Damit ein optimaler Ladefahrplan berechnet werden kann, muss das System den aktuellen Batteriefüllstand sowie die geplante Distanz und Abfahrtszeit der nächsten Fahrt kennen. Das Energiemanagementsystem nutzt diese Information zusammen mit Wettervorhersagen und Verbrauchsprognosen aus historischen Daten zum Abschätzen der Energieflüsse im Haus, und kann so einen optimalen Ladefahrplan erstellen. Umgesetzt wurde das System mit dem am Fraunhofer ISE entwickelten Software Framework »OpenMUC« (www.openmuc.org). Das modulare Konzept erlaubt die flexible Anpassung für unterschiedliche Anwendungen. Es unterstützt eine Vielzahl von Kommunikationsprotokollen und verfügt über ein integriertes Monitoring, wodurch es

- 1 *Beladung des Elektroautos mit Eigenstrom.*
- 2 *Die grafische Nutzeroberfläche visualisiert Energieflüsse im Haus und informiert über den aktuellen Ladestatus des Elektrofahrzeugs.*

die Entwicklung kundenspezifischer Lösungen im Smart Grid und Smart Home Bereich vereinfacht. Im Projekt vernetzt OpenMUC Stromzähler, Ladesäule, Wärmepumpe und Nutzerinterface miteinander.

Derzeit muss sich der Fahrer eines Elektrofahrzeugs über Nutzung und Reichweiten Gedanken machen. Die Akzeptanz des intelligenten Ladens wird über den Nutzen erreicht: das System spart Geld und macht das Fahren »grüner«. Entscheidend für die Akzeptanz ist allerdings vor allem die einfache und komfortable Bedienung im Alltag. Das am Fraunhofer ISE entwickelte System verfügt daher über eine intuitive Benutzeroberfläche und ermöglicht die Energieflüsse im Gebäude besser zu verstehen.

Zurzeit wird das Energiemanagementsystem in einem zweijährigen Feldversuch in einer Energieplushausgruppe in Fellbach erprobt. Dabei werden unterschiedliche Optimierungsstrategien getestet sowie Studien zur Usability und Nutzerakzeptanz des Gesamtsystems durchgeführt. Somit können die Bedürfnisse der Bewohner erfasst und die Systeme unter Berücksichtigung vielfältiger Kriterien einschließlich der Nutzerzufriedenheit weiterentwickelt werden.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) unterstützt.

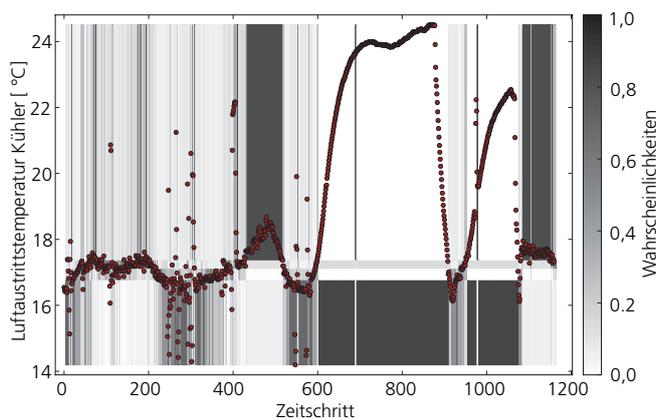
www.livinglab-bwe.de/projekt/fellbach-zeroplus



FEHLERERKENNUNG UND -DIAGNOSE IM ENERGETISCHEN GEBÄUDEBETRIEB

Ein großes Energiesparpotenzial liegt in der Betriebsführung von Gebäuden. Durch einen optimierten Gebäudebetrieb können 5–20 % des Energieverbrauchs eingespart werden. In der Praxis findet häufig eine unzureichende Überwachung von Gebäuden statt, weil Kontrollsysteme fehlen, die den Informationsgehalt der Daten aus Gebäudeleitsystemen nutzen. Im Rahmen der Projekte »ModQS« und »CASCADE« hat das Fraunhofer ISE modellbasierte Methoden zur automatischen Fehlererkennung und Diagnose entwickelt und getestet, die den energetischen Betrieb von Anlagen kontinuierlich überwachen und Fehler und Optimierungspotenziale zeitnah identifizieren.

Gesa Böhme, Marc Eisenbarth, Sebastian Herkel, Thorsten Müller, Felix Ohr, **Nicolas Réhault**, Tim Rist, Markus Saas, Sebastian Zehnle, Hans-Martin Henning



2 Automatische Fehlererkennung in der Kaltwasserversorgung einer Klimaanlage. Gemessene Luftaustrittstemperatur (Rot) und vom qualitativen Modell prognostizierte Wahrscheinlichkeiten (Graustufen). Ab Zeitschritt 600 liegen die Messwerte nicht mehr in dem Bereich, der vom qualitativen Modell vorhergesagt wurde. Insgesamt wurde für diese Anlage ein energetisches Einsparpotenzial von jährlich bis zu 160 MWh ermittelt.

1 Energieversorgung einer raumlufttechnischen Anlage in einem Flughafengebäude. Klimaanlage sind große Verbraucher thermischer und elektrischer Energie, deren Betrieb oft Einsparpotenziale birgt. Mit Methoden zur automatischen Fehlererkennung und -diagnose können diese erkannt, identifiziert und an das Facility Management übermittelt werden.

Im realen Betrieb benötigen Gebäude oft mehr Energie als aus einer Bedarfsrechnung zu erwarten ist. Dies liegt zum größten Teil an einem suboptimalen Betrieb der Anlagentechnik und der Existenz fehlerbehafteter Anlagenbauteile und Betriebszustände. Häufige Fehler sind z. B. defekte Sensoren, falsche Zeitpläne oder unzureichende Regelstrategien. Dabei fehlen in großen Liegenschaften, trotz moderner Gebäudeleitsysteme, Werkzeuge zur kontinuierlichen und automatischen Fehlererkennung und -diagnose. Für die nächste Generation von Gebäudeleit- und Energiemanagementsystemen entwickeln wir Algorithmen, die Fehler in gebäudetechnischen Anlagen, wie Klima-, Heizungs- oder Kälteanlagen, automatisch erkennen und diagnostizieren. Eine neue Methode auf Basis qualitativer Modelle wurde mit Messdaten einer großen Klimaanlage in einem Flughafen erfolgreich getestet (Abb. 1). Qualitative Modelle beschreiben näherungsweise das Verhalten dynamischer Systeme und sind in der Lage, zukünftige Zustände des Systems anhand von Wahrscheinlichkeiten zu prognostizieren. Sind die Auftretenswahrscheinlichkeiten möglicher Zustände für das Nominalverhalten des Systems bekannt, können vom Optimalbetrieb abweichende Betriebszustände erkannt werden. Vorteil dieser Methode ist, dass nur wenige Vorkenntnisse über das physikalische Verhalten der Systeme benötigt werden und sich durch die qualitative Betrachtung der Implementierungsaufwand minimieren lässt.

Diese Arbeiten wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und von der Europäischen Kommission unterstützt. www.modqs.de www.cascade-eu.org



INTEGRIERTE SIMULATION KOMPLEXER FENSTERSYSTEME

Fenster und Fassaden spielen für Tageslicht, solare Wärmegegewinne und thermische Verluste eine herausragende Rolle in der Optimierung der Gebäudeenergiebilanz. Die Entwicklung von Simulationsprogrammen, durch deren Berechnungen geringere Energiekosten und höherer visueller Komfort in Büroräumen erzielt werden kann, ist ein wesentliches Ziel des »Tageslichtverbundprojekts IV«. Dank kürzlich vorgenommener Verbesserungen in den Strahlverfolgungsprogrammen ist nun die Berechnung von lichtstreuenden Eigenschaften komplexer Fenstersysteme möglich. Auf Basis einer Matrix-Repräsentierung der Lichttransmission wurde die Simulationsplattform »Fener« entwickelt, die die Bewertung von Fenstersystemen bzgl. Tageslicht und Energiebilanz ermöglicht. Das Programm greift direkt auf detaillierte optische Messdaten zu, die mittels des Photogoniometers pab-pgII durchgeführt werden. Diese Kombination wird zur technischen Entwicklung von neuen, innovativen Fassadensystemen wie auch zu deren Marktintegration beitragen können.

Bruno Bueno, Johannes Hanek, Angelina Katsifaraki, Tilmann Kuhn, Jan Wienold, Helen Rose Wilson, Hans-Martin Henning

Komplexe Fenstersysteme (CFS – Complex Fenestration Systems) sind Systeme, die eine lichtstreuende oder schaltbare Schicht enthalten. Dazu zählen transluzente Wärmedämmungen und Sonnenschutzeinrichtungen wie Jalousien und Rollos. Wenn komplexe Fenstersysteme mit geeigneten Kontrollfunktionen kombiniert werden, kann der thermische und visuelle Komfort von Innenräumen deutlich gesteigert werden. Zugleich kann der Energiebedarf für Licht, Kühlung und Heizung reduziert werden.

- 1 Am KölnTriangle montiertes Jalousie-System.
- 2 Pab-pgII Goniophotometer am Fraunhofer ISE.

Da viele neuartige Fassadenmaterialien sehr komplex sind, benötigt man zur Charakterisierung hochentwickelte Messverfahren. Daher hat das Fraunhofer ISE ein leistungsfähiges Photogoniometer Pab-pgII der Firma pab advanced technologies Ltd. erworben. Das Photogoniometer misst die Lichtstreuung passiver Materialien ebenso wie die Winkelverteilung kleiner Lichtquellen. Die winkelauflösende Transmission und Reflektion des Lichts kann als bi-directional scattering distribution function (BSDF) gespeichert werden. BSDF-Datensets beschreiben die Art der Interaktion zwischen Licht und Material in ganzheitlicher Form.

Auf Grundlage dieser Matrixdarstellung wurde die Simulationsplattform »Fener« entwickelt. Diese umfasst sowohl genaue als auch rechnerisch effiziente Methoden, um thermische Energie und Tageslicht von Büroräumen mit komplexen Fenstersystemen zu simulieren. Zudem können Design-Alternativen schnell und kosteneffizient miteinander verglichen werden. Dadurch unterstützt »Fener« in Verbindung mit den Möglichkeiten der Materialcharakterisierung durch unser neues Photogoniometer die Industrie bei der Entwicklung neuer Fassadenprodukte und Gebäudeplaner bei der Auswahl kommerziell verfügbarer Technologien.

Die Arbeiten wurden durch Mittel des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützt.

SPEICHERTECHNOLOGIEN



Viele aktuelle Studien kommen zu dem Ergebnis, dass Energiespeicher eine wesentliche Rolle im zukünftigen Energiesystem spielen müssen. Es ist daher notwendig, effiziente und kostengünstige Energiespeicher zu entwickeln. Des Weiteren muss die komplette Kette der Energieversorgung betrachtet und entschieden werden, in welcher Form die Energie gespeichert werden soll, um den Bedarf in Form von Strom, Wärme, Kälte oder Antriebsenergie optimal zu befriedigen.

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

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

Im Bereich der elektrochemischen Speicher entwickeln wir für Blei-Säure-Batterien und verschiedenste Lithium-Ionen-Technologien Module und Systemlösungen mit den notwendigen Sicherheitskonzepten und Batteriemanagementsystemen. Diese Aktivitäten werden durch die thermische, elektrische und elektrochemische Modellierung von der Zelle bis zum System – inklusive Alterungsmodellen sowie Systemsimulation und Lebensdauerkostenanalysen – unterstützt. Wir entwickeln intelligente Lade- und Betriebsführungsstrategien, die problemlos in Mikrocontroller von Laderegler, Gerätesteuerungen sowie Batteriemanagementsystemen integrierbar sind. Für Lithium-Ionen-Batterien optimieren wir ferner den für die Performance und Lebensdauer wichtigen, aber auch kostenintensiven, Formierungsprozess. Für Redox-Flow-Batterien arbeiten wir an der Übertragung neuer Zellchemien auf die Zell- und Stack-Ebene, an der Entwicklung geeigneter Methoden zur Ladegradbestimmung und Kapazitätserhaltung sowie dem Batteriemangement mittels simulationsgestützter Analyse und Auslegung.

Stoffliche Speicher können elektrochemische Speicher bei der Speicherung erneuerbarer Energie ideal ergänzen. Am Fraunhofer ISE konzentrieren wir uns auf die elektrochemische Wasserstoffherzeugung durch die Membranelektrolyse. Vor allem die Lebensdaueranalyse und die Optimierung der Betriebsführung von Elektrolysezellen und -systemen stehen im aktuellen Fokus unserer Arbeiten. Die multiphysikalische Modellierung der Prozesse in einer Elektrolysezelle ist dabei ein wichtiges Werkzeug und unterstützt uns in der Auslegung von Zellstapeln und kompletten Systemen. Zur Vermessung großer Zellstapel für die PEM-Elektrolyse mit elektrischen Strömen bis 4000 Ampere und Spannungen bis 250 Volt bauen wir aktuell ein neues Testzentrum auf.

Mit der Entwicklung von beschleunigten Alterungstests auf Material- und Komponentenebene wollen wir schneller Aussagen zur Dauerhaltbarkeit von Elektrolysezellen treffen können.

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

Besonders für die Speicherung bei geringen Temperaturdifferenzen bieten Latentwärmespeicher deutlich höhere Speicherkapazitäten als konventionelle Wärmespeicher. Wir entwickeln und charakterisieren Latentspeichermaterialien sowie Speichersysteme in einem Temperaturbereich von -30 °C bis +600 °C. Simulationen dienen hierbei der optimalen Auslegung sowohl der Materialien als auch der Speichersysteme. Besonders für den stark an Bedeutung gewinnenden Markt der Kältespeicher versprechen Latentwärmespeicher eine hohe Kompaktheit und Effizienz.

Ein Vorteil von solarthermischen Kraftwerken ist eine zeitlich bedarfsorientierte Stromerzeugung, für die Hochtemperaturspeicher notwendig sind. Als Speichermedium wird meist Salzschnmelze eingesetzt. Für diese Anwendung entwickeln, vermessen, bewerten und optimieren wir Speicherkonzepte, die für Temperaturen von 200 °C bis 600 °C ausgelegt sind.

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt 49

Mitarbeiter vollzeitäquivalent 42

Zeitschriften- und Buchbeiträge 10

Vorträge und Konferenzbeiträge 17

Neu erteilte Patente 3

www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/60



Innenansicht des ServiceLab Batteries am Fraunhofer ISE. Dort stehen umfangreiche Prüfmöglichkeiten für Zellen, Batteriemodule und Gesamtsysteme mit bis zu 1000 V und 0,25 MW zur Verfügung.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr.-Ing. Peter Schossig

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

Dr. Günther Ebert

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

Batteriesysteme

Dr. Matthias Vetter

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

Redox-Flow-Batterien

Dr. Tom Smolinka

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

Latentwärmespeicher

Dipl.-Biol. Stefan Gschwander

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

Kältespeicher

Dipl.-Biol. Stefan Gschwander

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

Speicher für Niedertemperatur-Solarthermie

Dr.-Ing. Wolfgang Kramer

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

Hochtemperaturspeicher

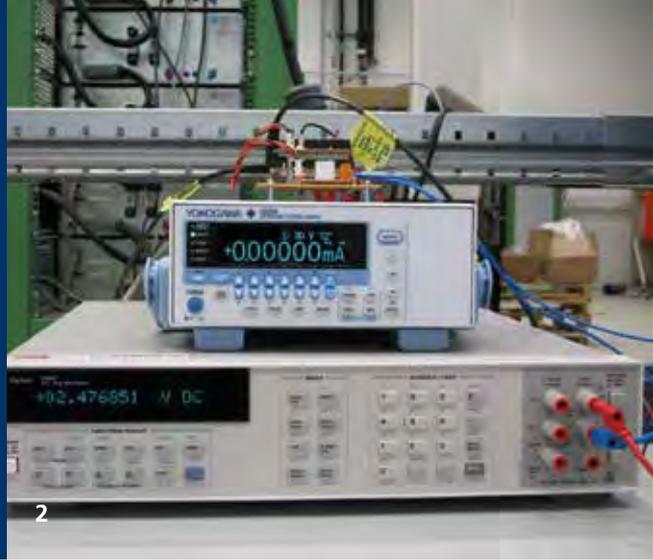
Dr. Werner Platzer

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

Membranelektrolyseure und Wasserstoffspeichersysteme

Dr. Tom Smolinka

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



BESCHLEUNIGTES FORMIERVERFAHREN FÜR LITHIUM-IONEN-ZELLEN

In der Elektromobilität, in stationären Anwendungen und im portablen Bereich dominieren Lithium-Ionen-Zellen zunehmend den Batteriemarkt. Um die Kosten dieser Speichertechnologie zu senken, müssen diese Batterien günstiger produziert werden können. Ein wesentlicher Bestandteil des Herstellungsprozesses ist das erstmalige Durchlaufen einer definierten Lade-Entlade-Sequenz der Batterie – der sogenannten Formierung – und das nachfolgende Ageing. Dieses Verfahren ist sehr zeitaufwendig und damit teuer. Das Fraunhofer ISE simuliert im Projekt »Protrak« die Vorgänge, die bei der Formierung ablaufen. Gestützt auf diese Ergebnisse werden neue Formierungsverfahren entwickelt, die wesentlich schneller sind und dabei die Eigenschaften der Lithium-Ionen-Zellen noch verbessern.

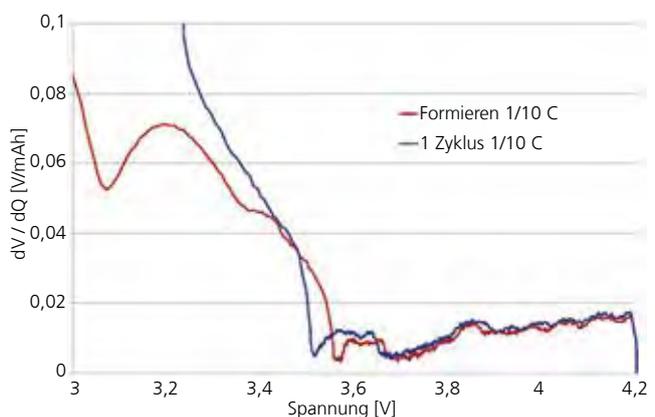
Maximilian Bruch, **Stephan Lux**, Lukas Rohr, Matthias Vetter, Günther Ebert

Im Verbundprojekt »Protrak« wurden gängige Formierungs- und Lagerungsprozesse aus der Industrie und der Stand der Wissenschaft untersucht. Hieraus wurden prozessrelevante Größen für die Formierung abgeleitet. Als Grundlage für die weiteren Arbeiten haben wir mit dem Fraunhofer ISIT mögliche Modellansätze entwickelt.

Die für die Entwicklung des Modells benötigten Testzellen hat das Fraunhofer ISIT zur Verfügung gestellt. Auf Basis des entwickelten Modells und der durchgeführten Formierversuche wurden optimierte Formierzyklen festgelegt, die die geforderte kalendarische Lebensdauer und Zyklenfestigkeit ermöglichen sowie den Zeitaufwand dieses Prozessschritts signifikant reduzieren. Diese Arbeiten sind grundlegend für die Ausarbeitung von Prozessoptimierungen für Zellen mit anderen Zellchemien. Die Befüllung mit Elektrolyt sowie die Formierung der Zellen führen wir am Fraunhofer ISE durch (Abb. 1).

1 Elektrolytbefüllung von Lithium-Ionen-Zellen in der Glovebox vor der elektrischen Formierung.

2 Teststand für hochgenaue Coulombmetrie.



3 Ableitung der Zellspannung über der Beladung während Formier- und Ladevorgang für eine NMC-Zelle (Nickel Mangan Kobalt).

Deutlich ist der Unterschied zwischen der ersten Beladung (Formiervorgang, rot) und der zweiten Beladung (blau) zu erkennen.

Zudem haben wir einen Teststand für die hochgenaue Coulombmetrie entwickelt (Abb. 2). In großangelegten Testmatrizen werden die verschiedenen möglichen Formierungszyklen unter definierten Bedingungen an Batterietestsystemen untersucht. Für das sogenannte Ageing ist beim Prozess der Zellfertigung die Zwischenlagerung großer Mengen von Zellen unter definierten Bedingungen erforderlich. Das ist sehr kostenintensiv. Es wird deshalb auf Grundlage der hochgenauen Coulombmetrie sowie der optimierten Formierzyklen ein Verfahren entwickelt, um diesen Aufwand deutlich zu reduzieren.

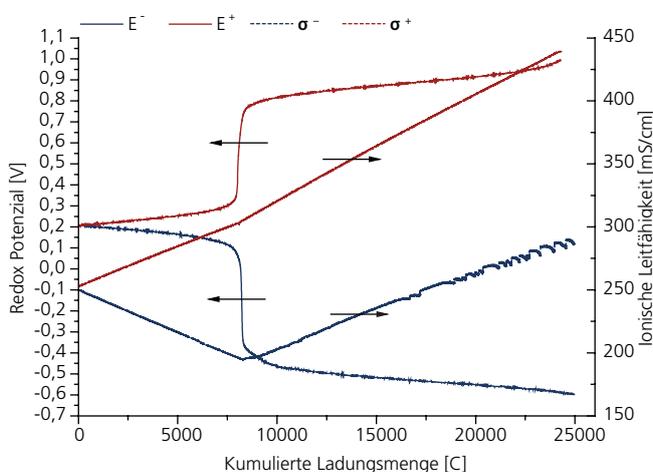
Das Projekt wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützt.



LADEGRADBESTIMMUNG VON REDOX-FLOW-BATTERIEN

Im Rahmen der Entwicklungsarbeiten zu skalierbaren Stromspeichern beschäftigen wir uns neben Stack- und Systementwicklung sowie Batteriemangement mit Methoden zur Ladegradbestimmung. Für die optimierte Betriebsführung von Redox-Flow-Batterien ist eine robuste, einfache und kostengünstige Ladegradbestimmung notwendig. Sie muss nicht nur den aktuellen Ladegrad ermitteln, sondern auch als Prognoseinstrument eingesetzt werden können, um Erzeuger und Lastkurven aufeinander abzustimmen. Hierzu evaluieren wir unterschiedliche Messmethoden wie offene Klemmspannung, ionische Leitfähigkeit und Redox-Potenzial der Elektrolyte auf Einzelzellebene und erproben diese in technisch relevanten Größenordnungen auf unseren vollautomatisierten Stack-Testständen.

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



3 Redox-Potenzial und ionische Leitfähigkeit für beide Halbzellen über der kumulierten Ladungsmenge während eines Ladungsvorgangs.

- 1 Zellstapel mit einem 5 kW_{el} Zell-Design während eines Langzeitversuchs im Teststand.
- 2 Neue Testanlage für Zellstapel mit einer elektrischen Leistung bis zu $35 \text{ kW}_{\text{el}}$.

Wesentlich für den wirtschaftlichen Betrieb einer Redox-Flow-Anlage ist neben einer hohen elektrischen Effizienz und hoher Zyklisierbarkeit die Kapazitätserhaltung bei hohen Standzeiten. Um die verfügbare Kapazität des Elektrolyten effizient zu nutzen, ist eine exakte Ladegradbestimmung essenziell. Unerwünschte Nebenreaktion im Elektrolyten und Transportprozesse über den Separator beeinflussen während des Betriebs einer Redox-Flow-Batterie den Ladegrad negativ und verringern dadurch die nutzbare Kapazität. Zur Bestimmung und Überwachung des Ladezustands evaluieren wir am Fraunhofer ISE verschiedene Messmethoden an Einzelzellen auf einem vollautomatisierten Teststand mit detaillierten Messprotokollen. Mittels geeigneter Sensorik ermitteln wir die offene Klemmspannung über eine Referenzzelle, die ionische Leitfähigkeit und die Redox-Potentiale der Elektrolyte. Den Verlauf der Redox-Potentiale und die ionischen Leitfähigkeiten des Anolyten und Katholyten für einen Ladevorgang einer Vanadium-Redox-Flow-Batterie zeigt Abb. 3. Die Messdaten werden über eine Ladungsmessung kalibriert und in Langzeitversuchen an Einzelzellen auf ihre Belastbarkeit geprüft.

Ziel ist, eine präzise Ladegradbestimmung durchzuführen und darauf aufbauend optimale Betriebsführungsstrategien zu entwickeln. Hierbei kommt der Prognosetauglichkeit der Ladegradbestimmungsmethode eine besondere Bedeutung zu. Zur Erprobung der Messmethoden und Betriebsführungsstrategien in technisch relevanten Größenordnungen stehen Testanlagen mit verschiedenen elektrischen Leistungen von 1 bis $2,5 \text{ kW}_{\text{el}}$, $2,5$ bis $10 \text{ kW}_{\text{el}}$, $4 \times 5 \text{ kW}_{\text{el}}$ sowie $35 \text{ kW}_{\text{el}}$ zur Verfügung.



SOLARBATTERIESYSTEME – DIENSTLEISTER FÜR DAS STROMNETZ?

An Gebäuden mit Photovoltaik-Anlagen werden vermehrt Stromspeicher installiert, um die volatile Solarstromerzeugung mit den jeweiligen Lastprofilen in Deckung zu bringen. Allerdings nutzen Solarstromspeicher mit rein lokalen Betriebsführungsvorgaben ihr technisches Potenzial nicht voll aus. Häufig sind freie Batteriekapazitäten vorhanden, mit denen bei Bedarf Systemdienstleistungen für das Stromnetz erbracht werden könnten. Besonders vielversprechend ist hierbei die Bereitstellung von Primärregelleistung in Kombination mit einer lokalen Erhöhung des Autarkiegrads. Die Grundidee ist, jeweils einen Teil der technisch verfügbaren Speicherkapazität für unterschiedliche Netzserviceleistungen zu reservieren, während der andere Teil zur Optimierung der lokalen Energieflüsse dient.

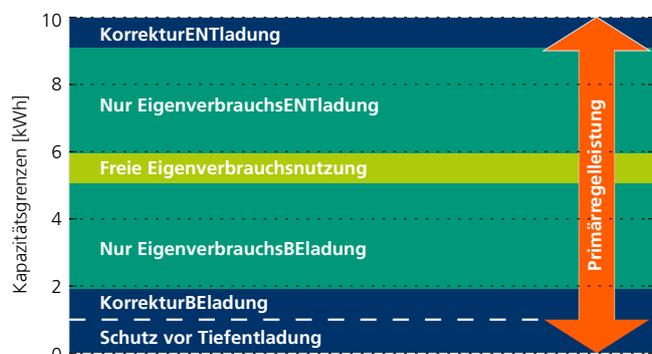
Georg Bopp, Thomas Erge, **Raphael Hollinger**, Günther Ebert

Für die erfolgreiche Energiewende müssen die neuen Akteure und Anlagen im elektrischen Energiesystem neben der Energielieferung auch Aufgaben zur Erbringung von Systemdienstleistungen (z. B. Regelleistungsreserve und Blindleistungsbereitstellung) von den konventionellen Erzeugern übernehmen, um:

- in Zeiten ausreichender Erzeugung aus erneuerbaren Energien auf konventionelle Erzeuger verzichten zu können,
- neben der Wirkleistungsbereitstellung weitere Einnahmequellen für dezentrale und erneuerbare Erzeuger zu erschließen.

Im Projekt »Net-PV« wird daher der Ansatz eines Verbundkraftwerks dezentraler PV-Batteriesysteme mit Blockheizkraftwerken entwickelt und in einem Feldversuch getestet. Die Bereitstellung von Primärregelleistung in Kombination mit lokaler

1 Im Smart Energy Lab des Fraunhofer ISE werden neu entwickelte Konzepte umgesetzt und getestet.

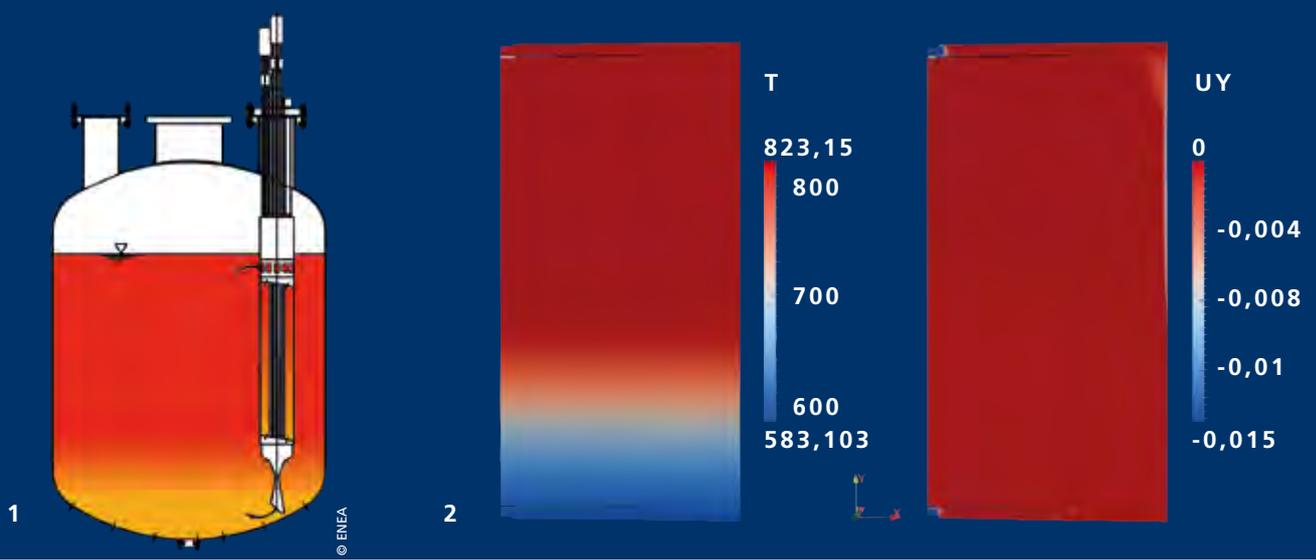


2 Nutzung einer Batterie, die unabhängig vom Ladezustand Primärregelleistung bereitstellt (oranger Pfeil), abhängig vom Ladezustand die Autarkie des lokalen Energiesystems erhöht (grüne Bereiche) und im Notfall durch Korrekturladung gestützt wird (blaue Bereiche).

Erhöhung des Autarkiegrads und Reduktion der Netzlast zur übergeordneten Netzebene wurde dabei als wirtschaftlich und technisch besonders interessante Option identifiziert.

Die bisherigen Simulationen und Untersuchungen machen deutlich, dass Solarstromspeicher über den heute üblichen Einsatzzweck – Erhöhung des Eigenverbrauchs von lokal erzeugtem PV-Strom – hinaus einen Zusatznutzen bereitstellen können, sowohl lokal als auch für das Energie- und Verteilungssystem. Dies ist nicht nur gesamtsystemisch wünschenswert, sondern verkürzt auch die Amortisationszeiten der relativ hohen Investitionen in Speichersysteme. Die Bereitstellung unterschiedlicher Dienstleistungen ist durch die entwickelten Algorithmen sogar symbiotisch.

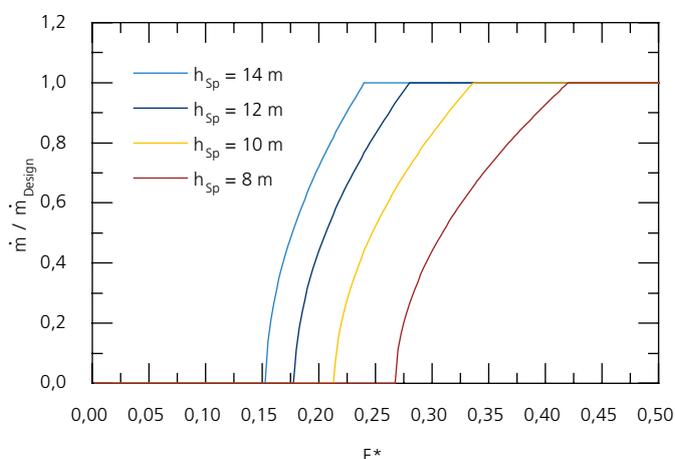
Das Projekt wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) unterstützt.



HOCHTEMPERATURSPEICHER MIT INTEGRIERTEM DAMPFERZEUGER

Durch thermische Speicher in solarthermischen Kraftwerken ist es möglich, Strom auch bei Bewölkung oder nach Sonnenuntergang zu produzieren. Dies ist ein großer Vorteil gegenüber Wind- oder Photovoltaik-Anlagen; es erhöht die Netzstabilität und Versorgungssicherheit. Überschüssige Wärme wird in großen Tanks gespeichert und bei Bedarf zum Betrieb des Kraftwerksprozesses verwendet. Bislang wird in kommerziellen Anlagen ein Flüssigsalzspeicher mit zwei Tanks eingesetzt. Ein Ansatz zur Kostenreduktion ist die Speicherung von heißem und kaltem Salz in demselben Tank, getrennt durch den Dichteunterschied. Dieses System ermöglicht zudem die direkte Integration des Dampferzeugers in den Speichertank, was weitere Vorteile mit sich bringt.

Thomas Fluri, **Bernhard Seubert**, Werner Platzer



3 Relative Zirkulationsrate durch den Dampferzeuger in Abhängigkeit der relativen Speicherbeladung E^* für verschiedene Speicher Ausführungen h_{sp} bei gleicher Dampferzeugerkonfiguration.

1 Prototyp-System: Speicher mit integriertem Dampferzeuger, Zirkulation des Speichermediums durch den Dampferzeuger aufgrund des Dichteunterschieds zwischen Primärseite und Speicher.
2 Resultate einer Speicherbeladungssimulation mit CFD; Temperaturverteilung (links) und Geschwindigkeitsprofil (rechts).

Der Fokus des Projekts lag auf der Modellierung, Analyse, Optimierung sowie der praktischen Realisierung der Speicher-Dampferzeugerkombination. Hierfür wurde das System in drei verschiedenen Skalierungsstufen betrachtet. Ein Prototyp des Systems (Abb. 1) wurde zu Beginn des Projekts beim Projektpartner ENEA in Betrieb genommen und getestet. Die entwickelten numerischen Modelle wurden mit den Ergebnissen des Prototyps validiert, um dann für die Auslegung und das Design des Systems im Pilot- und kommerziellen Maßstab verwendet zu werden. Um die Pilotanlage mit einer Speicherkapazität von 50 MWh_{th} an ein bestehendes solarthermisches Kraftwerk anzuschließen, haben wir detaillierte Auslegungsrechnungen und technische Zeichnungen angefertigt. Designkonzepte wurden im kommerziellen Maßstab erarbeitet und Kosteneinsparungen ermittelt, um einen Vergleich mit anderen Speichersystemen zu ermöglichen.

Wir konnten den Speicher hinsichtlich Schichtungsverhalten, Naturumlauf und Dampferzeugerleistung optimieren. Eine möglichst gute Trennung von heißem und kaltem Speichermedium ist für einen hohen Wirkungsgrad des Gesamtsystems essenziell. In Simulationen konnten wir zeigen, dass das Speicherhalten durch einfache konstruktive Maßnahmen deutlich verbessert werden kann. Das Gesamtsystem wurde zudem hinsichtlich einer hohen Zirkulationsrate des Speichermediums auf der Primärseite des Dampferzeugers optimiert. Durch Veränderung der Komponentenanzahl im Speicher kann die Zirkulationsrate bei gleichen Randbedingungen um ein Vielfaches erhöht werden (Abb. 3).



PHASENWECHSELMATERIAL-EMULSIONEN ZUR WÄRMESPEICHERUNG

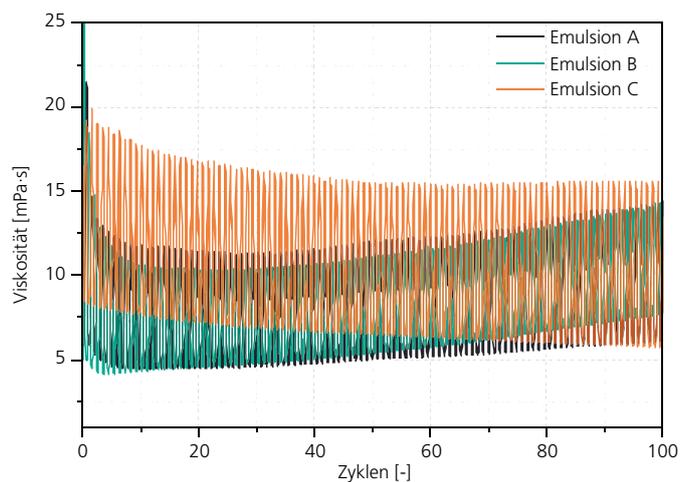
Mit PCM-Emulsionen kann bei kleinen Temperaturspreizungen die Speicherdichte gegenüber Wasser um das Vier- bis Fünffache erhöht werden. Dadurch kann das Speichervolumen 4 bis 5 mal kleiner sein, sodass Bauraum und Gewicht gespart werden. Die Wärmespeicher- und Transportflüssigkeiten eignen sich besonders für Kühlanwendungen, aber auch für Niedertemperatur-Heizsysteme im Gebäude und im technischen Bereich. Um sie herzustellen, werden Hochleistungsparaffine in Wasser dispergiert. Bei einer Paraffinkonzentration von 30 Gew.-% und einer Temperaturspreizung von 6 K wird eine Wärmekapazität von etwa 100 kJ/kg erreicht. Im Labor- und Technikums-Maßstab haben wir bereits eine hohe Stabilität gegenüber thermischer und mechanischer Belastung erzielt.

Stefan Gschwander, Lili Jia, Sophia Niedermaier, Peter Schossig, Laura Vorbeck, Hans-Martin Henning

Bei Emulsionen wird Öl in Wasser dispergiert, wobei möglichst reine Paraffine genutzt werden, die hohe Wärmekapazitäten aufweisen. Zur Wärmespeicherung wird der Phasenwechsel des Paraffins von fest nach flüssig und umgekehrt genutzt. So können z. B. Hexadecan und Octadecan im Phasenwechsel etwa 230 kJ/kg speichern. Die Stabilität der Emulsion wird durch Tenside eingestellt. Beim Einsatz als Wärmeträgermedium müssen die Tenside nicht nur die Lagerstabilität der Emulsionen sicher stellen, sondern auch die Stabilität beim Phasenwechsel und bei der Scherung, die z. B. beim Pumpen der Flüssigkeit entsteht.

Die am Fraunhofer ISE hergestellten PCM-Emulsionen aus 30 Gew.-% Octadecan weisen bei einer Temperaturspreizung von 6 K eine Wärmekapazität von etwa 100 kJ/kg auf. Damit kann in diesem Temperaturbereich viermal so viel Wärme wie mit Wasser gespeichert werden. Bei Zyklierungsversuchen im

1 *Stabile PCM-Emulsion nach thermisch-mechanischer Zyklierung im Rheometer.*



2 *Thermisch-mechanisch stabile PCM-Emulsionen, die im Rheometer über 100 thermische Zyklen mit einer Scherrate von 100 1/s geschert wurden.*

Rheometer zeigen die hergestellten Emulsionen bereits eine sehr hohe thermisch-mechanische Stabilität (Abb. 1, Abb. 2). Ihre Einsatzbereiche reichen von technischen Anwendungen bis hin zum Gebäudebereich. Durch ihre hohe Speicherkapazität können Speichervolumina deutlich kleiner werden, was besonders bei mobilen Anwendungen günstig ist. Durch die quasi isotherme Wärmespeicherung im Phasenwechsel können auf Kühlflächen bei vergleichsweise geringen Volumenströmen zudem sehr homogene Temperaturen erzielt werden.

Unsere Forschung wird durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützt.

WASSERSTOFF- UND BRENNSTOFFZELLENTechnologie



Der Ausbau der erneuerbaren Energien ist gekennzeichnet durch einen zunehmenden Anteil fluktuierender Stromerzeugung aus Wind- und Solarenergie. Dadurch entstehen neue Herausforderungen hinsichtlich der bedarfsgerechten Anpassung von Stromangebot und -nachfrage im Netz. Wasserstoff, der über die Wasserelektrolyse mittels Strom aus erneuerbaren Energien erzeugt werden kann, besitzt als einziger Energieträger das Potenzial, sehr große Energiemengen auch über lange Zeiträume in chemischer Form zu speichern. Wasserelektrolyseure sind als dezentrale, regelbare Lasten im Stromnetz für die Stadtwerke oder Netzbetreiber eine immer wertvollere Regelgröße, um die Stromerzeugung zeitnah dem Verbrauch anzupassen und damit die Netzfrequenz zu stabilisieren. Darüber hinaus bildet nachhaltig erzeugter Wasserstoff als Kraftstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen das Bindeglied zur emissionsfreien Mobilität mit Betankungszeiten und Reichweiten, die mit der jetzigen Mobilität vergleichbar sind.

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

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

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

Wir haben langjährige verfahrens- und prozesstechnische Erfahrung mit der thermochemischen Wasserstofferzeugung fossiler und biogener Energieträger. Zu diesen Verfahren zählen die Reformierung und die Pyrolyse. Darüber hinaus

haben wir unsere Arbeiten auf nicht-energetische (stoffliche) Anwendungen biogener Energieträger erweitert. Wir entwickeln Verfahren, um aus Wasserstoff und Kohlendioxid flüssige Energieträger, wie DME oder OME, oder chemische Bausteine zu synthetisieren, die bislang aus Erdöl hergestellt werden. In experimentellen Untersuchungen oder Studien prüfen wir die technologische Machbarkeit von neuen, energieeffizienten und ressourcenschonenden Verfahren.

Mit unserem Forschungsangebot zu elektrochemischen und verfahrenstechnischen Prozessen ermöglichen wir den Übergang von der Verwendung fossiler Energieträger hin zu einer nachhaltigen und CO₂-freien Energiewirtschaft.

Unsere Forschung umfasst:

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

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	76
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	63
Zeitschriften- und Buchbeiträge	7
Vorträge und Konferenzbeiträge	16
Neu erteilte Patente	2

www.ise.fraunhofer.de/de/veroeffentlichungen/40



Detailausschnitt einer Miniplant-Anlage am Fraunhofer ISE zur Herstellung von Methanol und Dimethylether (DME) unter Verwendung von Kohlendioxid und Wasserstoff.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Christopher Hebling

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

Wasserstoffherzeugung durch Wasserelektrolyse

Dr. Tom Smolinka

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

Thermochemische Verfahren zur Wasserstoffherzeugung

Dr. Thomas Aicher

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

Brennstoffzellensysteme

Dipl.-Ing. Ulf Groos

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

Stoffliche Biomassennutzung

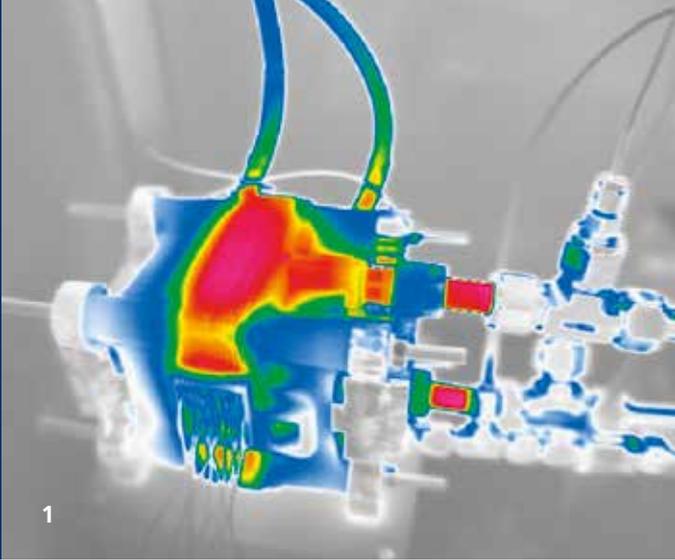
Dr. Thomas Aicher

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

Power-to-Liquid

Dr.-Ing. Achim Schaadt

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



1



2

LANGZEITUNTERSUCHUNGEN AN PEM-DRUCK-ELEKTROLYSEUREN FÜR PTG-ANWENDUNGEN

Im Power-to-Gas (PtG)-Konzept wird elektrische Energie aus regenerativen Quellen chemisch in Form eines energiereichen Gases gespeichert. In diesem Verbundprojekt wird der mittels Elektrolyse hergestellte Wasserstoff mit Kohlendioxid in Methan umgewandelt, das problemlos im Erdgasnetz gespeichert und transportiert werden kann. Für die Wasserstoffherzeugung ist die PEM-Elektrolyse ein besonders geeignetes Verfahren: Der Einsatz einer Membran als Festelektrolyt resultiert in hohen Leistungsdichten. Aufgrund der hervorragenden Über- und Teillastfähigkeit kann sie sehr dynamisch betrieben werden. Durch den Zellaufbau ist der Betrieb bei hohen Drücken möglich, so dass auf die für die Methanisierung notwendigen Kompressoren verzichtet werden kann.

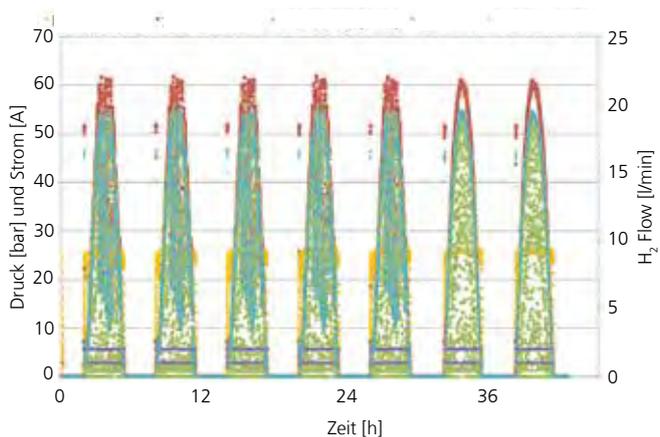
Peter Gesikiewicz, Beatrice Hacker, **Tom Smolinka**,
Christopher Hebling

Um das Subsystem »Elektrolyse« innerhalb des Gesamtsystems »Power-to-Gas« besser zu verstehen, haben wir eine Testfeldumgebung aufgebaut, mit der unterschiedliche Lastprofile abgebildet und die Langzeitstabilität auf Systemebene unter realen Bedingungen getestet werden kann. Zudem wurde über mehrere tausend Stunden bei stationären Bedingungen das Degradationsverhalten auf Stack-Ebene untersucht.

Zur Optimierung der dynamischen Betriebsführung haben wir ein 6 kW PEM-Elektrolysesystem unseres Partners H-TEC Systems charakterisiert und eine detaillierte Analyse einzelner Komponenten vorgenommen. Der komplette Elektrolyseur wurde in verschiedenen Lastpunkten und während der Aufprägung fluktuierender Leistungsprofile energetisch bilanziert. Die Ergebnisse dienen neben der Aufdeckung von Verlusten der iterativen Weiterentwicklung von Hardware und Betriebsführung in typischen Anwendungsfällen.

1 Thermografieaufnahme eines PEM-Druckelektrolyse-Stacks. Der Stack wurde über mehrere tausend Stunden in einem unserer voll-automatischen Teststände betrieben.

2 PEM-Druckelektrolysesystem von H-TEC Systems in der Testfeldumgebung des Fraunhofer ISE.



3 Dynamisches Verhalten des PEM-Elektrolyseurs unter Aufprägung eines fluktuierenden Leistungsprofils eines typischen Solargenerators über eine Woche an wechselhaften und sonnigen Tagen.

Die Experimente haben gezeigt, dass die Dynamik eines PEM-Druckelektrolyseurs, sowohl Wind- als auch PV-gekoppelt, den Anforderungen in PtG-Systemen vollumfänglich genügt. Es ergaben sich gute Wirkungsgrade, die im unteren Teillastbereich noch weiter optimiert werden können. Die erzielten Nutzungsgrade hingen wesentlich vom Verhältnis der Nennleistung des Elektrolyseurs zur nominellen Leistung der Erzeugungsanlage ab. Die Gasqualität des produzierten Wasserstoffs erreichte über den gesamten Messzeitraum ausgezeichnete Werte. Mit den gewählten Randbedingungen lassen sich im simulierten Geschäftsmodell bis zu 4700 Volllaststunden jährlich erzielen.

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



SCHNELLALTERUNGSTESTS FÜR PEM-BRENNSTOFFZELLEN

Das Herz einer Brennstoffzelle ist die Membran mit den beidseitig beschichteten Elektroden. Die einzelnen Materialien altern bei verschiedenen Belastungssituationen im Betrieb unterschiedlich schnell. In ausführlichen Langzeitexperimenten haben wir die Degradation der Bestandteile einer Membranelektroden Einheit in Abhängigkeit der elektrochemischen Belastung analysiert. Dadurch konnten wir quantifizieren, wie sich Belastungen wie Start-Stopp, elektrische Lastsprünge, Ruhezellspannung, Feuchtezyklen etc. auf die Lebensdauer einer Brennstoffzelle auswirken. Dies ist die Voraussetzung, um zukünftig die Lebenserwartung einer Brennstoffzelle in Abhängigkeit ihrer Betriebsbedingungen online abschätzen zu können.

Dietmar Gerteisen, **Ulf Groos**, Christian Sadeler, Mario Zedda, Christopher Hebling

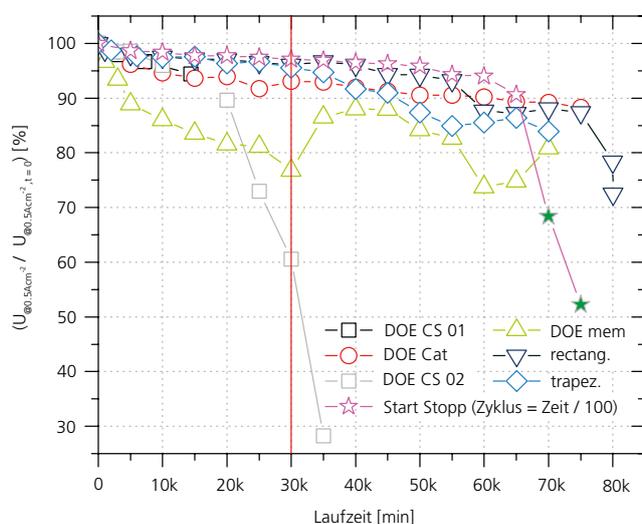
1 Brennstoffzellenlabor für Lebensdaueranalysen.

Die Degradationsphänomene einer PEM-Brennstoffzelle zu verstehen, ist entscheidend, um künftig noch stabilere Materialien entwickeln und die Lebensdauer von Brennstoffzellen verlängern zu können. Außerdem ist dieses Verständnis die Grundlage für die Entwicklung von »State-of-Health«-Modellen, die die Lebensdauer eines konkreten Systems online abschätzen. Sie könnten z. B. den Fahrer eines Brennstoffzellenautos auf eine notwendige Wartung aufmerksam machen.

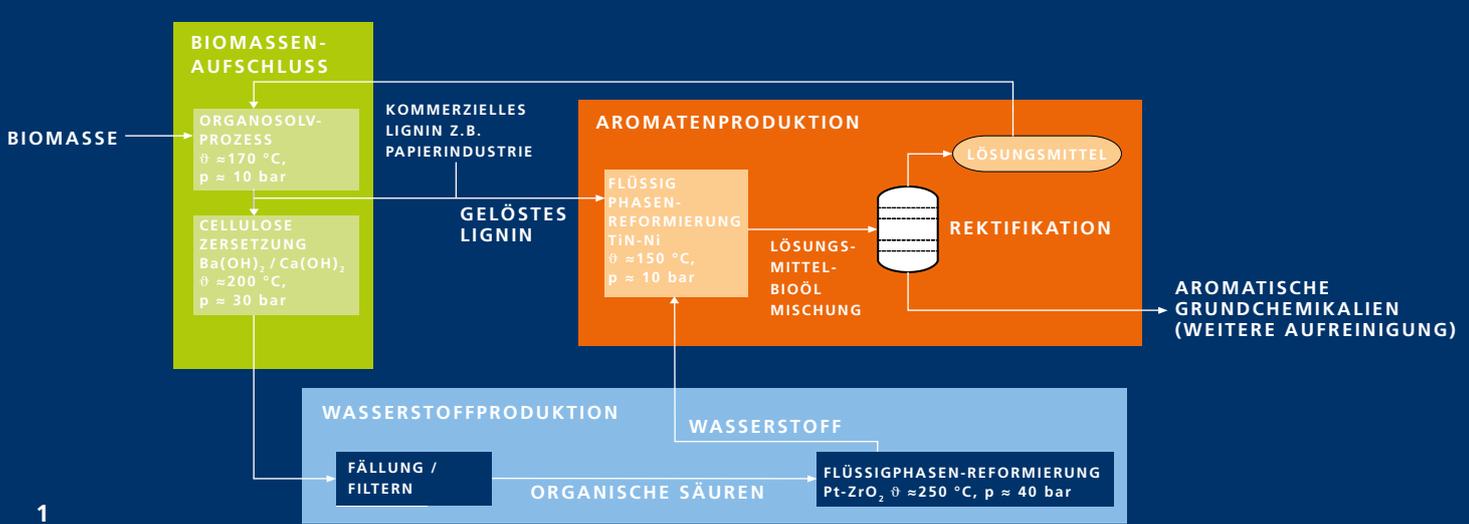
Um die Alterungseffekte in Abhängigkeit von Betriebsereignissen zu quantifizieren, haben wir Schnellalterungsprotokolle aus der wissenschaftlichen Literatur übernommen und experimentell in Langzeitversuchen mit einigen zehntausend Zyklen angewandt. Dadurch konnten wir die zeitabhängige Alterung durch Start-Stopp-Vorgänge, durch die Belastung mit Ruhezellspannung sowie durch Lastsprünge unterschiedlicher Ausprägung bestimmen und diese den einzelnen Materialien einer Membranelektroden Einheit zuordnen.

Die entscheidenden Parameter, um die Degradation zu beschreiben, waren neben Spannung und Strom die elektrochemische aktive Oberfläche der Elektroden, die Protonenleitfähigkeit der Membran, die Diffusionshemmung für die Reaktanden, die Geschwindigkeit der Wasserstoff-Diffusion durch die Membran sowie die Doppelschichtkapazität der Kathode. Hierzu wurden Zyklovoltammetrie, lineare Voltammetrie und elektrochemische Impedanzspektroskopie angewandt.

Die Arbeiten wurden vom Ministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Projekte »LDP« und »STRESS« unterstützt.



2 Abnahme der Zellspannung in Abhängigkeit von unterschiedlichen Schnellalterungstests bis zu 80 000 Zyklen.



GRUNDBAUSTEINE DER CHEMISCHEN INDUSTRIE AUS BIOMASSE GEWINNEN

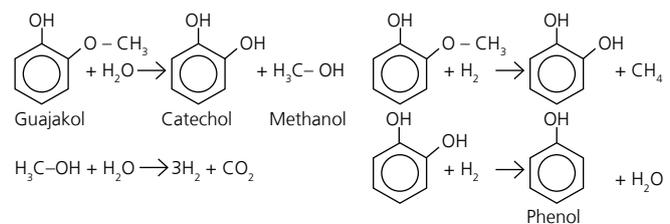
Während in heutigen Verfahren zum Aufschluss von Biomasse gezielt einzelne Produkte (z. B. Zellulose) aus Biomasse gewonnen werden, bleibt ein großer Teil des Ausgangsstoffs, häufig Lignin, ungenutzt und verunreinigt zurück. Ziel unseres Vorhabens ist, den natürlichen Rohstoff möglichst komplett zu nutzen. Hierfür ist die Umwandlung von Lignin, eines Gerüstpolymers auf Basis aromatischer Kohlenwasserstoffe, von zentraler Bedeutung. Im Projekt »Dendrofining« soll dieses Biopolymer in flüssiger Phase mit Hilfe heterogener Katalyse in kleinere Einheiten aufgespalten werden, ohne dabei die einzelnen Bausteine zu zerstören. Ligninmonomere sind wertvolle aromatische Grundchemikalien, die derzeit in der chemischen Industrie aus Erdölfractionen gewonnen werden.

Thomas Aicher, Malte Otromke, Christopher Hebling

In einem Fraunhofer-Max-Planck-Gemeinschaftsprojekt wird ein neuartiger, integrierter Gesamtprozess zur Gewinnung aromatischer Grundchemikalien aus Biomasse im Labormaßstab entwickelt und erprobt. In Abb. 1 ist der Gesamtprozess vereinfacht dargestellt. Die Biomasse wird in Lignin und eine wässrige Phase mit organischen Säuren getrennt. Das Lignin wird anschließend in einem einfachen Alkohol gelöst und mit einem neuartigen Katalysator durch Hydrogenolyse depolymerisiert. Der Katalysator wird am Max-Planck-Institut für Kolloide und Grenzflächen entwickelt. Der Wasserstoff, der für den Ligninaufschluss erforderlich ist, wird durch Flüssigphasenreformierung der organischen Säuren aus dem ersten Prozessschritt gewonnen.

Um die Lignindepolymerisation zu untersuchen, wurden zunächst Versuche mit Ligninersatzstoffen, z. B. Guajakol, durchgeführt. Dabei haben wir eine selektive Umwandlung zu einfacheren Aromaten erreicht. Diese Reaktionen sind wichtig

1 Gesamtprozessschema einer integrierten Biorefinerie zur Erzeugung aromatischer Grundchemikalien bestehend aus Biomasseaufschluss (grün), Wasserstoffherzeugung (blau) und Lignindepolymerisierung mittels Hydrogenolyse (orange).



2 Vereinfachtes Reaktionsnetzwerk von Guajakol in Wasser unter hydrothermalen Bedingungen.

Katalysator	Umsatz Guajakol	Ausbeute		
		Catechol	Phenol	Adsorbierte Spezies
Pt/ZrO ₂	0,96	0,47	0,28	0,25
Pt/ZrO ₂ + MeOH	>0,99	0,01	0,56	0,43
Pt/TiO ₂	0,34	0,00	0,00	0,99
Pt/C	0,84	0,67	0,05	0,28
Ni/C	0,36	0,05	0,01	0,94

3 Umsätze und Ausbeuten der hydrothermalen Reaktion von Guajakol.

für das spätere Einengen des Produktspektrums. Es wurde der Einfluss von Pt- und Ni-basierten Katalysatoren auf die Modellsubstanz Guajakol unter hydrothermalen Bedingungen untersucht. Wir haben dabei die in Abb. 3 aufgeführten Umsätze und Ausbeuten ermittelt. Mit kinetischen Parametern kann ein Reaktionsverlauf errechnet werden, in dem die Verweilzeiten so eingestellt sind, dass ein Maximum des gewünschten Produkts (z. B. Phenol) vorliegt. Die Reaktionsgeschwindigkeit und Ausbeute der einzelnen Stoffe kann einfach über die Zugabe sehr geringer Mengen Methanol (z. B. 1/3 molar zu Guajakol) gesteuert werden.



© badenova AG und Co. KG

KOMMUNALER ENERGIEVERBUND – POWER-TO-GAS IN FREIBURG NORD

Power-to-Gas als Form der Energiespeicherung und Notwendigkeit bzw. Unterstützungsmaßnahme für die Energiewende wird aktuell in Wissenschaft und Gesellschaft intensiv diskutiert. Um entsprechende Anlagen auch jenseits der reinen Demonstrationsprojekte bauen zu können, sind jedoch deren Wirtschaftlichkeit und Integration in die jeweiligen Netze entscheidend. Im Projekt »Kommunaler Energieverbund« entwickeln Experten des Fraunhofer ISE aus den Fachgebieten Power-to-Gas sowie Energiemanagement und Netze in Kooperation mit der Hochschule Offenburg Betriebsführungsalgorithmen für Power-to-Gas-Anlagen im Verbund mit Strom- und Gasnetz. Ziel ist, eine ökonomische bzw. energiewirtschaftliche Sinnhaftigkeit von Power-to-Gas-Anlagen im kommunalen Kontext zu erreichen.

Raphael Hollinger, **Christopher Voglstätter**,
Christopher Hebling

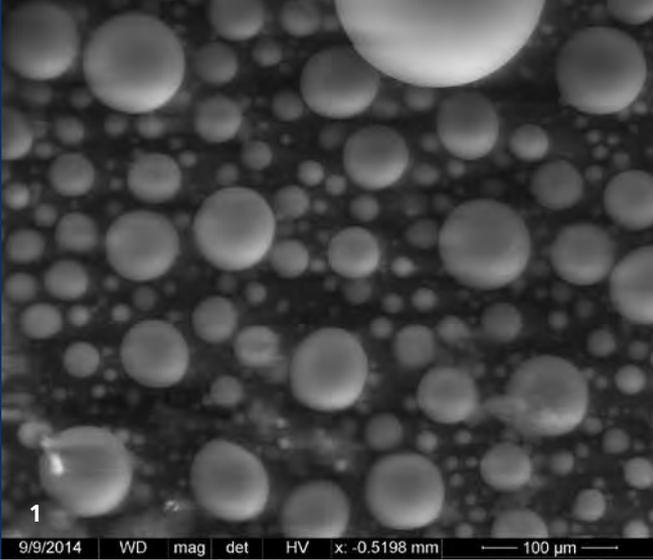
Für die Elektrolyseanlage als Kernkomponente einer Power-to-Gas-Anlage wird im Rahmen des Projekts »Kommunaler Energieverbund« ein Steuerungsalgorithmus erarbeitet, mit dem es möglich ist, verschiedene Geschäftsmodelle für die Steuerung solcher Anlagen zu bewerten und die Anlagen optimiert zu betreiben. Sie sollen dabei unter den Rahmenbedingungen eines kommunalen Energieverbunds gesteuert werden. Neben den lokalen elektrischen Netzen werden auch – sofern sinnvoll – Wärme- und Gasnetze berücksichtigt. Entwickelt und getestet wird der Algorithmus in einem dafür zu erstellenden Simulations-Framework, mit dem verschiedene Szenarien und Rahmenbedingungen untersucht werden können.

1 Offenburger Gasdruckregelanlage des Verbundpartners und örtlichen Verteilernetzbetreiber badenova / bnnetze.

Als Teil des Projekts wird zudem die Errichtung einer Power-to-Gas-Demonstrationsanlage im Norden der Stadt Freiburg im Breisgau geprüft und bei Bewilligung umgesetzt. Damit können dann die Wasserstoff-Einspeisung in das kommunale Verteilnetz demonstriert, die Algorithmen validiert und Projektergebnisse überprüft werden.

Durch die Kooperation mit der Hochschule Offenburg als Verbundpartner werden Betriebsalgorithmen als Baustein eines kommunalen Energieversorgers und als Baustein eines Industrieunternehmens mit den entsprechenden veränderten Rahmenbedingungen und Größenordnungen erzeugt und verglichen, wodurch weitere Erkenntnisse für Power-to-Gas im kommunalen Maßstab erzeugt und erprobt werden.

Das Projekt wird mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg und durch den beim Karlsruher Institut für Technologie eingerichteten Projektträger unterstützt.



EXPERTENNETZWERK BRENNSTOFFZELLEN-PRODUKTIONSTECHNOLOGIE

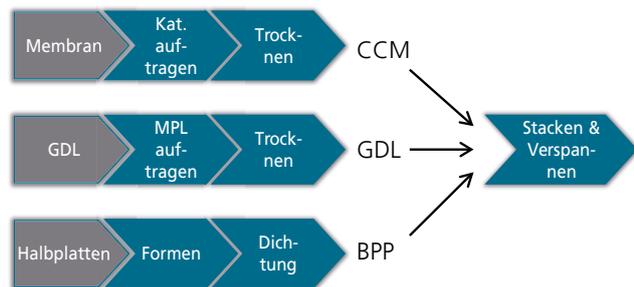
Bei der Verbreitung der Brennstoffzellentechnologie lässt sich momentan ein klassisches »Henne-Ei-Problem« beobachten. Die Hersteller von Produktionsanlagen halten sich mangels Größe des Brennstoffzellen-Markts mit Investitionen zurück, während die Anwender auf geeignete Produktionsanlagen warten. Um dieses Dilemma zu überwinden und die Basis für eine breitere Nutzung der Brennstoffzellentechnologie zu schaffen, haben wir ein Expertennetzwerk zur Entwicklung skalierbarer Produktionsverfahren initiiert. Das fundierte Fachwissen unserer Brennstoffzellen-Experten nutzen wir dabei ebenso wie unsere langjährige Erfahrung mit der Entwicklung und Optimierung von Produktionstechnologien und Fertigungskonzepten.

Robert Alink, Max Bergau, Daniel Biro, **Florian Clement**, Ulf Groos, Florian Pier, Benjamin Thaidigsmann, Ralf Preu, Christopher Hebling

Einer signifikanten Verbreitung der Brennstoffzellentechnologie stehen noch immer hohe Produktionskosten sowie eine unzureichende Wasserstoffinfrastruktur entgegen. Letzteres will die Initiative »H₂Mobility« in Deutschland ändern. Bereits für 2015 sind 50 Wasserstofftankstellen vorrangig in Ballungsräumen geplant. Schon im Jahr 2023 sollen 400 Tankstellen uneingeschränkte Wasserstoff-Mobilität ermöglichen.

Die Produktionskosten sind allerdings immer noch hoch. Hier schaffen wir im Rahmen des »Technologie-Netzwerks für Brennstoffzellen-Produktionstechnologie H2PRO« gemeinsam mit acht Industriepartnern Abhilfe. Zusammen entwickeln wir skalierbare Produktionslösungen für PEM-Brennstoffzellen. Dabei steht die techno-ökonomische Bewertung verschiedener Herstellungsansätze im Fokus. Mit den Forschungsergebnissen können die geeigneten Produktionstechnologien ausgewählt werden, und zielgerichtete Investitionen den Weg zu einer

1 ESEM-Aufnahme (environmental scanning electron microscope) einer am Fraunhofer ISE hergestellten mikroporösen Schicht (MPL), die eine homogene Gaszufuhr in der Brennstoffzelle sicherstellt. Das Wassermanagement ist sehr wichtig für die Funktion der Zelle. Daher wird die MPL mit einer PTFE-Beimischung hydrophobisiert. Die wasserabweisende Eigenschaft zeigt sich an hohen Kontaktwinkeln der Wassertropfen im Bild.

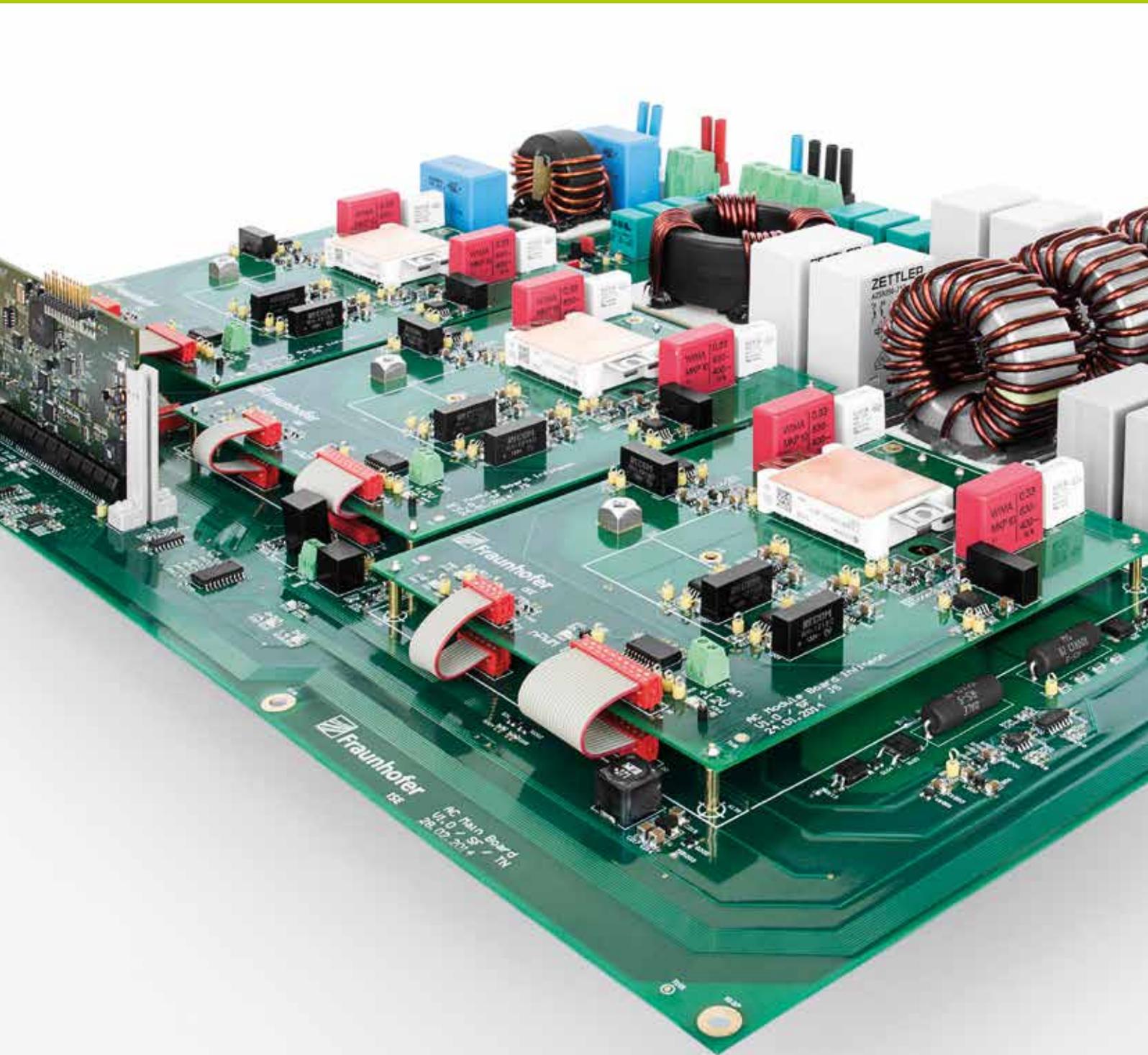


2 Vereinfachter Produktionsablauf zur Herstellung eines PEM-Brennstoffzellenstacks. Eine Einzelzelle besteht aus einer Membran mit beidseitiger Katalysatorbeschichtung (CCM, Catalyst Coated Membrane), einer Gasdiffusionslage (GDL, Gas Diffusion Layer) und einer Bipolarplatte (BPP, Bipolar Plate).

kostengünstigen Brennstoffzellenfertigung ebnet. Dies wiederum ist eine Grundlage für die intensivere Nutzung von Wasserstoff als Energieträger sowohl für die individuelle Mobilität als auch in Nutzfahrzeugen.

Die Arbeit im Industrienetzwerk wird flankiert von internen Entwicklungsarbeiten zur Elektrodenbeschichtung und der Erzeugung mikroporöser Schichten auf der Kohlenstoff-Gasdiffusionslage für homogene Gaszufuhr. Hierfür setzen wir unsere Beschichtungs- und Siebdruckanlagen ein und nutzen unsere umfangreichen Charakterisierungsmöglichkeiten zur Performance-Messung der Proben und Testzellen.

ENERGIEEFFIZIENTE LEISTUNGSELEKTRONIK



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

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

Wechsel- und Umrichter, DC/DC-Konverter und Laderegler sind die zentralen Komponenten sowohl zur Aufbereitung der elektrischen Energie von Stromerzeugern wie PV-Anlagen, Windkraftanlagen und BHKWs als auch zur Systemintegration von elektrischen Speichersystemen. Das Fraunhofer ISE entwickelt hocheffiziente Komponenten für diese Anwendungen im Leistungsbereich von unter 100 Watt bis in die Megawatt-Klasse. Wir sind auf diesem Gebiet seit Jahrzehnten ein weltweit führender Forschungs- und Entwicklungspartner für die Industrie und können auf viele patentierte Schaltungskonzepte zurückgreifen. Darüber hinaus übertragen wir unsere Konzepte und Erkenntnisse auf andere Anwendungsgebiete wie Mittelspannungstechnik, Bahntechnik oder leistungselektronische Komponenten für den Einsatz in der Luftfahrt.

In vielen Anwendungsbereichen nimmt die Nachfrage nach leistungsfähigeren Komponenten bei gleichzeitig reduzierten Produktionskosten permanent zu. Als Partner der Industrie hat die Suche nach neuen Lösungen am Fraunhofer ISE einen sehr hohen Stellenwert. Besonders vielversprechend ist der Einsatz modernster aktiver und passiver Bauelemente wie Transistoren aus Siliciumkarbid oder Galliumnitrid. So wird es zukünftig möglich sein, mit Schaltfrequenzen bis in den MHz-Bereich zu arbeiten, was den Einsatz kleinerer Induktivitäten erlaubt und so einen erheblich kompakteren und kostengünstigeren Aufbau ermöglicht. Weitere Herausforderungen sind steigende Anforderungen an die Qualität der Ausgangsspannung und die Regeleigenschaften sowie die Integration von Zusatzfunktionen, wie das Bereitstellen von Blindleistung.

Auch im Bereich der Elektromobilität sind unsere effizienten leistungselektronischen Komponenten unverzichtbar. Wir haben ein bidirektionales Schnellladegerät zur Ladung von Elektrofahrzeugen mit einer Leistung von 22 kW und einem Wirkungsgrad von über 98 % entwickelt, das so kompakt ist, dass es sich sowohl in externen Ladestationen als auch on-board verwenden lässt. Konzepte aus der Photovoltaik führten zu Volumenreduktion und besseren Produkteigenschaften. Neben leitungsgebundenen Ladesystemen arbeiten wir auch an induktiven Hochleistungs-Ladesystemen mit über 20 kW Nennleistung. Damit lässt sich der zukünftige Wunsch nach kabelloser Ladung von Elektrofahrzeugen ebenso erfüllen wie die Bereitstellung von Netzstützungsfunktionen.

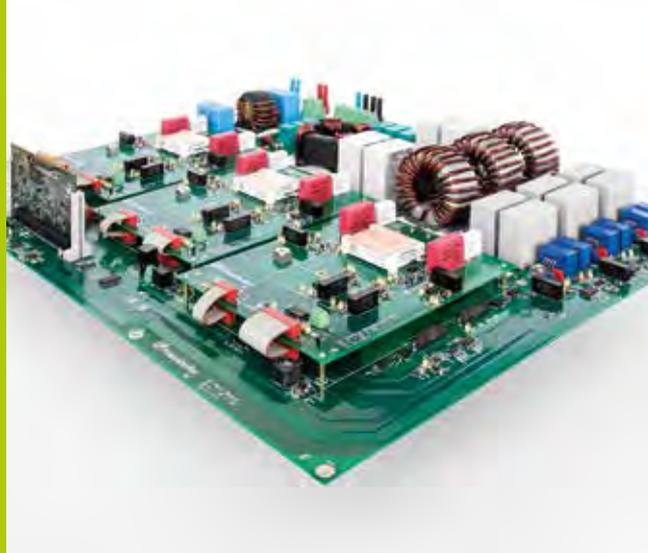
Das Fraunhofer ISE besitzt umfangreich ausgestattete Labors mit modernsten Generatoren sowie Mess- und Prüfgeräten. Selbstverständlich sind dort auch alle Prüfungen nach den einschlägigen Geräternormen und internationalen Netzeinspeisegerichtlinien möglich. Zusammen mit Industriekunden führen wir auch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

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	47
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	41
Zeitschriften- und Buchbeiträge	2
Vorträge und Konferenzbeiträge	24
Neu erteilte Patente	1

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



3-phasiger PV-Wechselrichter für den Laboreinsatz. Der modulare Aufbau ermöglicht den effizienten Test neuester Schaltungstopologien und Halbleitermodule. Mit dem digitalen Signalprozessor und der umfangreichen Messwerterfassung können neue Regelalgorithmen praxisnah untersucht und optimiert werden.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Günther Ebert

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

Netzgekoppelte Wechselrichter und Speichersysteme

Dr.-Ing. Olivier Stalter

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

Netzferne Energiesysteme

Dipl.-Ing. Florian Reiners

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

Elektromobilität

Dipl.-Ing. Stefan Reichert

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

Neue Bauelemente und Anwendungen

Dirk Kranzer M. Eng.

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

Stromnetze

Dipl.-Ing. Sönke Rogalla

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



DC/DC-WANDLER ZUR EFFIZIENTEN ANBINDUNG VON BATTERIEMODULEN AN HOCHVOLT-BUS

Elektrische Speicher, die Unterschiede in Erzeugung und Verbrauch ausgleichen können, sind beim Ausbau erneuerbarer Energien von großer Bedeutung. Auch in netzfernen Energiesystemen und zum Antrieb von Elektrofahrzeugen werden Speicherlösungen benötigt. Da Batteriezellen eine geringe Zellspannung besitzen, muss die Spannung für die Zielanwendung angepasst werden. In Batteriepacks werden höhere Spannungen durch harte Reihenverschaltungen der Einzelzellen realisiert, wodurch die schwächste Zelle alle anderen Zellen begrenzt und der Defekt einer Zelle zum Ausfall des gesamten Batteriepacks führt. Ein modulares Konzept in Kombination mit intelligenter Leistungselektronik kann diese Nachteile minimieren. Dies führt zu Systemen mit hoher Zuverlässigkeit bei geringen Wartungskosten.

Michael Eberlin, Florian Reiners, Olivier Stalter, Günther Ebert

Bei der Entwicklung eines Batteriespeichersystems lassen sich unterschiedliche Batteriespannungen durch harte Reihenverschaltung der Einzelzellen realisieren. Die direkte Kopplung der Batteriezellen in herkömmlichen Systemen ist oft die Hauptursache einer beschleunigten Batteriealterung, was eine sinkende Systemeffizienz sowie eine Erhöhung der Wartungskosten mit sich bringt. Nachteilig wirkt sich aus, dass der Defekt einer Zelle zum Ausfall des gesamten Speichers führen kann. Auch die Herstellung der Batteriepacks ist aufwendig, ebenso wie der Austausch einer defekten Einzelzelle. Dies führt ferner zu Systemverlusten, da aufgrund von Alterungsprozessen der übrigen Zellen die ersetzte Zelle nicht voll genutzt werden kann.

Im Rahmen des Projekts »Cell-Booster« wird ein neuer technischer Lösungsansatz untersucht, der die Energie- und Kosteneffizienz von heute üblichen Batteriespeichersystemen optimiert und gleichzeitig deren Betriebs- und Lebensdauer

1 Erstes Labormuster der mit 100 kHz taktenden »Embedded Elektronik« zur entkoppelten Anbindung von 48 V Batteriepacks an einen 800 V Hochvolt-Bus. Durch die Leistungselektronik erfolgte eine direkte Impedanzwandlung auf Modulebene, was zu einer einfachen Wartung sowie optimalen Ausnutzung der einzelnen Batteriepacks führt. Dadurch verbessert sich die Energie- und Kosteneffizienz von heutigen Batteriespeichersystemen deutlich.

verlängern soll. Die hier angestrebte Innovation bezieht sich auf die Systemtechnik mit dem Schwerpunkt auf einer neuartigen »Embedded Elektronik«, dem sogenannten »Cell-Booster«. Diese Elektronik bewirkt eine direkte Impedanzanpassung und DC/DC-Wandlung, was zu einer Entkopplung des 48 V Batteriepacks führt und ein Modul bildet. Durch den modularen Aufbau wird nicht nur die Systemeffizienz gesteigert, sondern auch die einfache Umsetzung einer Hybridbatterie ermöglicht. Somit können Speichersysteme aus einer Kombination von Blei-Säure- und Lithium-Ionen-Batterien direkt aufgebaut und je nach Eigenschaft individuell zyklert werden.

Die Wartung der Anlage ist unkompliziert, da der Austausch einzelner Module sogar im Betrieb möglich wird. Dies sichert eine lange Lebensdauer der Anlage, da beim Defekt von Zellen problemlos ein Modul mit einem Batteriepack der neuesten Generation mit völlig unterschiedlichen Eigenschaften ersetzt werden kann. Die Leistungselektronik wurde am Fraunhofer ISE unter Einsatz moderner Halbleiter entwickelt. Ein erster Demonstrator wurde aufgebaut (Abb. 1) und wird derzeit in Betrieb genommen. Ziel des Projekts ist, einen Demonstrator zu entwickeln, der in realitätsnaher Testumgebung auf seine Praxistauglichkeit geprüft wird.

Das Projekt wird vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Hightech-Strategie der Bundesregierung unterstützt.



1



2

LEISTUNGSELEKTRONIK FÜR PV-KRAFTWERKE DER ZUKUNFT

In heutigen PV-Kraftwerken liegt die Systemspannung üblicherweise bei maximal 1000 V. Im Projekt »HiDC-PV-Kraftwerke« wird eine Kraftwerkstechnologie entwickelt, die mit den maximal möglichen Spannungen der Niederspannungsrichtlinien arbeitet. Durch die im Verhältnis reduzierten Ströme können erhebliche Ersparnisse bei Kosten und Ressourcen erzielt werden. Es wurden verschiedene Leistungselektronikkonzepte mit DC-Spannungen von 1000 V bis +/- 1500 V miteinander verglichen. Dabei wurden sowohl die Kosten für die Balance of System-Komponenten (BOS) ermittelt, als auch die Effizienz der leistungselektronischen Systeme untersucht.

Stephan Liese, Sönke Rogalla, **Stefan Schönberger**, Olivier Stalter, Günther Ebert

- 1 Multi-Megawatt PV-Kraftwerk.
- 2 Prototyp des DC/DC-Stellers für den Einsatz in großen PV-Kraftwerken.

Als Ausgangspunkt wurde ein Kraftwerkskonzept nach dem Stand der Technik definiert (Abb. 3: Fall A). Um den Einfluss der Leistung auf die Kosten zu untersuchen, wurde dieses Konzept auf 3 MW skaliert. Dadurch ergeben sich Einsparungen in den BOS-Kosten von 16 %. Den Einfluss des Spannungsniveaus zeigt die Analyse weiterer drei Konzepte mit erhöhtem Spannungsniveau (Abb. 3: Fall B–D). Jedes dieser drei Konzepte führt zu einer BOS-Kostenreduktion von weiteren 15 % gegenüber dem 3 MW-Referenzkonzept.

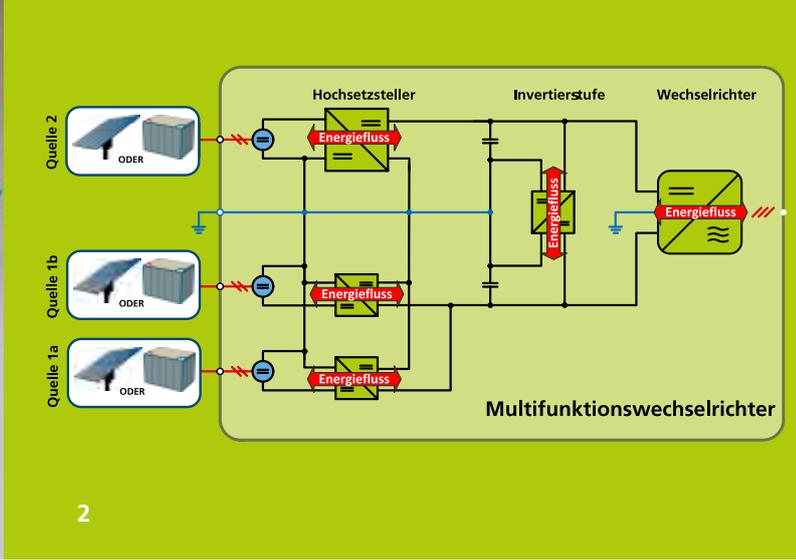
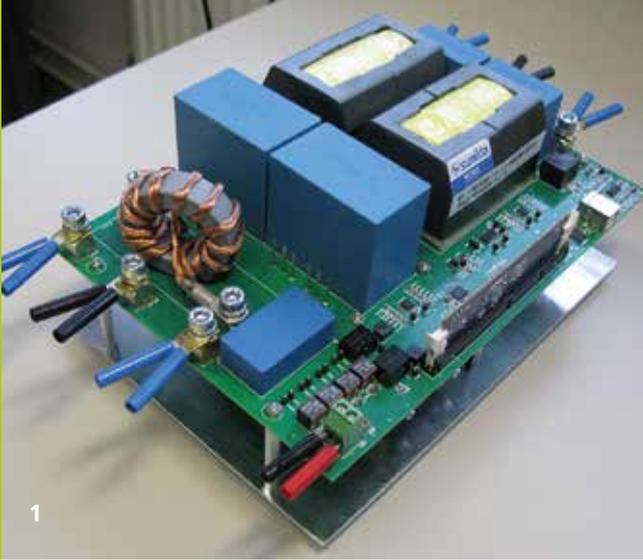
Zur Bestimmung der Verluste und Wirkungsgrade der Konzepte haben wir Simulationsberechnungen angestellt. Für den Referenzfall A wurde eine übliche 2-Level-Topologie simuliert, während für die Fälle B bis D aufgrund der erhöhten Spannung eine 3-Level-Topologie gewählt wurde. In Fall C kann derselbe Umrichter wie in Fall B verwendet werden, der dank des Festspannungsbetriebs jedoch eine um 50 % erhöhte Nennleistung aufweist. Für Fall D muss der Umrichter mit spannungsfesteren Halbleitern ausgeführt werden. Mit allen Topologien sind Wirkungsgrade von über 98 % möglich. Lediglich Fall D weist Schwächen bei hohen Spannungen auf.

Für die in Fall C benötigten DC/DC-Steller haben wir eine innovative Topologie verwendet, die große Vorteile gegenüber einem üblichen DC/DC-Steller aufweist. Es wurde bereits ein Prototyp mit einer Leistung von 250 kW und einem Wirkungsgrad von über 99 % aufgebaut. Die Realisierung eines 3-Level-Umrichters ist in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner geplant.

Das Projekt »HiDC-PV-Kraftwerke« wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützt.

A	Stand der Technik (Referenz): 1.000 V _{DC} / 360 V _{AC} / 1-3 MVA	
B	Stand der Technik mit erhöhter Spannung: 1.500 V _{DC} / 570 V _{AC} / 3 MVA	
C	2-stufiges Konzept mit fester Spannung im Zwischenkreis: 2x 1.500 V _{DC} / 1.000 V _{AC} / 3 MVA	
D	Bipolarer PV-Generator: 3.000 V _{DC} / 1.000 V _{AC} / 3 MVA	

3 Übersicht der untersuchten Kraftwerkskonzepte mit einem DC-Spannungsniveau von 1000 V bis +/- 1500 V. Mit den neuen Konzepten kann das Potenzial der gemäß Niederspannungsrichtlinie maximal erlaubten AC-Spannung von 1000 V vollständig ausgereizt werden.



MULTIFUNKTIONSWECHSELRICHTER ZUR EIGENVERBRAUCHSOPTIMIERUNG

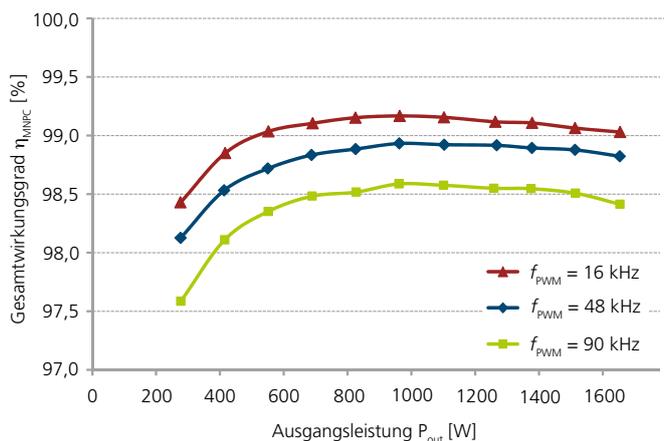
Steigende Strompreise und stark sinkende Einspeisevergütung nach dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) veranlassen immer mehr Stromkunden zum Eigenverbrauch des selbst erzeugten Solarstroms. Um dies technisch einfach realisieren zu können, haben wir am Fraunhofer ISE einen hocheffizienten dreiphasiger Wechselrichter mit innovativer Topologie und drei multifunktionalen Eingängen entwickelt. Die Eingänge können wahlweise mit Solargenerator(en) und / oder Batterie(n) verbunden werden, so dass alle gängigen Modul- und Batterietypen (für Spannungen > 100 V) genutzt werden können. Dadurch hat der Nutzer ohne aufwendige Konfiguration des Wechselrichters die Möglichkeit, flexibel die DC-Quelle zu wählen. Ein optimierter Eigenverbrauch ist somit gewährleistet.

Corentin Gasser, **Andreas Hensel**, Dirk Kranzer, Christian Schöner, Olivier Stalter, Günther Ebert

Um verschiedene Quellen in das System einzubinden und alle notwendigen Energieflüsse zu realisieren, wurde eine innovative Topologie entwickelt (Abb. 2). Durch die Überlastfähigkeit kann das System auch im Inselbetrieb genutzt werden. Zusätzlich haben wir eine Regelung mit automatischer Quellenerkennung für alle Betriebsmodi entwickelt. Der hochkompakte Demonstrator mit den Abmaßen 28,2 x 32 x 14,2 cm³ beinhaltet alle notwendigen Komponenten und Wandlerstufen. Hier wurden minimale Leerräume und Abstände zwischen den Bauteilen realisiert. Die Wandlerstufen haben wir mit Leistungsmodulen aus Siliciumkarbid (SiC)-Transistoren ausgeführt. Durch die so in allen Wandlerstufen erreichte Taktfrequenz von 48 kHz konnten platinenmontierbare Drosseln eingesetzt werden, die zu erheblichen Kostenvorteilen in der Produktion führen. Zusätzlich senkt die Baugrößenreduzierung der passiven Bauelemente den Ressourcenbedarf und damit auch die Systemkosten. Um Gewicht zu sparen wurde ein

1 Demonstrator des DC-Teils des Multifunktionswechselrichters mit DC-Eingangsstufen und Invertierstufe.

2 Mögliche Anlagenkonfigurationen des Multifunktionswechselrichters mit geerdetem Mittelpunkt.



3 Wirkungsgrade einer Phase der Wechselrichterstufe bei verschiedenen Taktfrequenzen. Der Demonstrator wurde für eine Taktfrequenz von 48 kHz aufgebaut.

beidseitig nutzbares, aktives Kühlaggregat integriert, mit dem sowohl die AC- als auch die DC-Leistungsmodul kosten-, energie- und platzeffizient entwärmt werden können. Das Gesamtsystem hat ein Gewicht von weniger als 10 kg. Es besteht aus einer vierteiligen DC-Stufe mit drei Eingangsboostern und einer quasiresonanten Invertierstufe, einem Zwischenkreis und einer dreiphasigen Wechselrichterstufe mit 3-Level-Topologie. Die Einzelwirkungsgrade der Stufen liegen trotz der hohen Schaltfrequenz von 48 kHz jeweils bei 98,2 % (Abb. 3).

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

EMISSIONSFREIE MOBILITÄT



Die Elektromobilität wird in unserem Alltag immer deutlicher sichtbar: Begriffe wie Plug-in-Hybrid, Batterieelektrische Mobilität, Brennstoffzellen-Fahrzeug, aber auch Rekuperation, Range-Extender oder Schnellladestation sind in den Medien präsent.

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

- Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge
- Batteriesysteme für mobile Anwendungen
- Netzintegration von Elektrofahrzeugen
- Brennstoffzellen-Mobilität
- Wasserstoffinfrastruktur
- Wärmemanagement in Fahrzeugen

Fahrzeugbatterien müssen so in das Smart Grid eingebunden werden, dass den wachsenden Anforderungen des Stromnetzes Rechnung getragen wird. Wir entwickeln Hard- und Softwarelösungen für die kommunikative Anbindung von Ladestationen, zur erzeugungsgerechten Ladung und zur Erbringung von Netzdienstleistungen. Wir bieten technologische sowie wirtschaftliche Bewertungen und Simulationen zu Netzfragen.

Im Bereich Traktionsbatterien entwickeln wir Module und Systeme mit den notwendigen Sicherheitskonzepten und Batteriemanagementsystemen. Dazu gehört die thermische, elektrische und elektrochemische Modellierung von der Zelle bis zum System inklusive Alterungsmodellen und Lebensdauerkostenanalysen. Wir entwickeln intelligente Lade- und Betriebsführungsstrategien, die in Mikrocontroller von Laderegler, Gerätesteuern sowie Batteriemanagementsystemen integrierbar sind.

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

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

Wasserstoff kann emissionsfrei mit regenerativen Stromerzeugern und Elektrolyse erzeugt werden. Dies untersuchen und

demonstrieren wir mit unserer Solaren Wasserstoff-Tankstelle zusammen mit zwei Brennstoffzellen-Fahrzeugen. Wir nutzen dies als Forschungsplattform für zukünftige Mobilität, Komponententests und ganzheitliche Energiekonzepte. Wir beraten zu Fragen der Wasserstoff-Infrastruktur und entwickeln innovative Technologien für die Membranelektrolyse. Dafür stehen uns Teststände für Zellstapel bis 1 MW_{el} zur Verfügung.

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

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

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

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	36
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	34
Zeitschriften- und Buchbeiträge	5
Vorträge und Konferenzbeiträge	8

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



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

ANSPRECHPARTNER

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



1

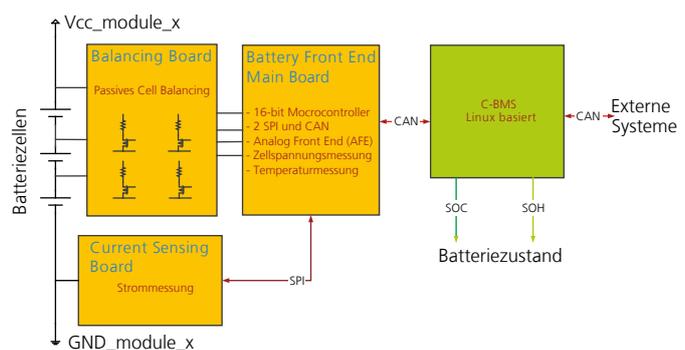
INNOVATIV STRUKTURIERTES BATTERIEMANAGEMENTSYSTEM

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

Naqqash Abbassi, Nikolaus Lang, **Stephan Lux**, Peter Raab, Matthias Vetter, Günther Ebert

Batteriemanagementsysteme sind die zentrale Intelligenz des Batteriesystems. Sie verhindern sowohl eine Überladung als auch eine Tiefentladung des Batteriesystems. Eine hochgenaue Spannungsmessung jeder Batteriezeile ist neben der präzisen Messung des Stroms auch die Basis für eine korrekte Ladezustands- und Alterungsbestimmung. Hierzu entwickelt das Fraunhofer ISE stochastische Filterverfahren, wie den sogenannten Partikelfilter, die es ermöglichen, den Ladezustand (SOC) sowie den Alterungszustand (SOH) jeder einzelnen Zelle während des Betriebs mit hoher Genauigkeit zu ermitteln. Grundlage für die Zustandsbestimmung stellen sogenannte Batteriemodelle dar, die durch Messungen im Batterielabor parametrisiert und validiert werden. Am Fraunhofer ISE wird ein System entwickelt, das aus einem sogenannten Battery Frontend pro Batteriemodul sowie einem übergeordneten zentralen Batteriemanagementsystem (C-BMS, Abb. 1) besteht. Hierbei ermöglicht das Frontend neben den Mess- und Balancing-Funktionen eine intelligente Anbindung über den

1 Zentrales Batteriemangement (C-BMS) für ein Lithium-Ionen-Batteriesystem.



2 Die Systemarchitektur des entwickelten Batteriemanagementsystems. Das erweiterbare, intelligente, hochgenaue Battery Frontend kommuniziert über den CAN Bus mit dem zentralen Batteriemanagementsystem (C-BMS).

CAN-Bus an das C-BMS. Das Cell Balancing sorgt auf der Basis der hochgenauen Zustandsbestimmung für einen Ausgleich der einzelnen Zellladungen.

Im Rahmen der Fraunhofer Systemforschung »Elektromobilität II« baut die Fraunhofer-Gesellschaft ihre erfolgreichen Arbeiten auf dem Gebiet der Elektromobilität weiter aus.

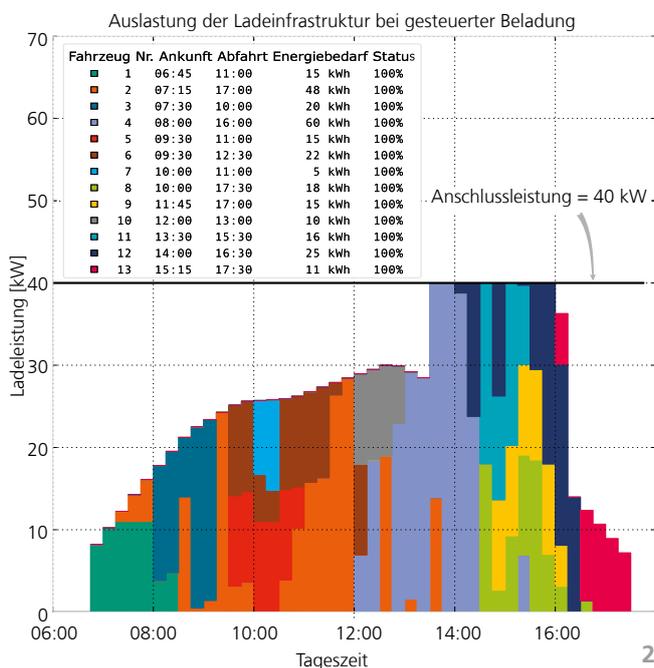
Das Fraunhofer ISE entwickelt hierbei ein innovatives Batteriemanagementsystem für ein Leichtbauenergiepack, das mit den oben genannten Vorzügen jederzeit einen sicheren und reichweitenoptimierten Betrieb gewährleistet.



ELEKTROFAHRZEUGE OPTIMAL INTEGRIEREN

Gewerbliche Energiesysteme mit großen elektrischen und thermischen Lasten werden immer öfter durch erneuerbare Energieerzeugungsanlagen erweitert und über Energiemanagementlösungen (EMS) gesteuert. Oft existiert darüber hinaus ein Fuhrpark, der weitgehend elektrifiziert werden kann. Eine solche Flotte benötigt eine Vielzahl von Lademöglichkeiten am Standort. Die Summe der Ladeleistungen der Flottenfahrzeuge übersteigt allerdings schnell die Bemessungsleistung verfügbarer Netzanschlüsse. Innovative Lösungen des Fraunhofer ISE haben zum Ziel, einen optimalen Ladebetrieb innerhalb der Bemessungsgrenzen des Netzanschlusses sicherzustellen und die signifikanten Lasten der ladenden Fahrzeuge gewinnbringend für die bestehende EMS-Lösung zu nutzen.

Felix Braam, Robert Kohrs, **Michael Mierau**, Günther Ebert



- 1 *Gewerbepark »Innopark« in Kitzingen, das »Living Lab« im »Intellan«-Projekt.*
- 2 *Einsatz des Optimierungsalgorithmus zur fuhrparkscharfen Ladeplanung. Die optimierten Ladepläne nutzen die Flexibilität der Fahrzeuge, um zum einen den Netzanschluss nicht zu überlasten und zum anderen die verfügbare PV-Erzeugung optimal einzusetzen.*

Im Projekt »Intellan« wird ein gewerbliches Energiesystem mit großen, lokalen, regenerativen Energieerzeugungsanlagen (Abb. 1) um eine Ladeinfrastruktur für Elektrofahrzeuge erweitert. Durch eine innovative Betriebsführung ist ein optimaler Lastfluss im Gesamtsystem gesichert: Aufgrund der flexiblen Fahrzeuglasten wird der Eigenanteil am erzeugten PV-Strom erhöht und Bezugsspitzen aus dem Netz reduziert. Um die Integrationskosten zu minimieren, wird die bewährte Betriebsführung des gewerblichen Energiesystems nicht modifiziert, sondern Zustands- und Stellgrößen ermittelt, über die das Systemverhalten erkannt und beeinflusst werden kann. Für die Ladeinfrastruktur haben wir einen Optimierungsalgorithmus entwickelt, der – basierend auf Bezugsleistungsbändern – fuhrparkscharfe Ladepläne erstellt (Abb. 2). Über diese abstrakte Schnittstelle kann das Energiemanagement-Gateway verschiedene Informationen – von der Bemessungsleistung des Netzanschlusses über den Bedarf der gewerblichen Lasten bis zur Verfügbarkeit an regenerativer Energie – in die Optimierung einfließen lassen.

Unsere Kompetenzen in selbstlernenden Systemen und in prognosebasierter Betriebsführung fließen in das Energiemanagement-Gateway ein. Es ist die vermittelnde Instanz zwischen der Ladeinfrastruktur und dem gewerblichen EMS. Das Ergebnis ist ein modulares Gesamtsystem, in dem die Komplexität der jeweiligen Teilsysteme transparent bleibt.

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



CHARAKTERISIERUNG AUTOMOBILER BRENNSTOFFZELLEN

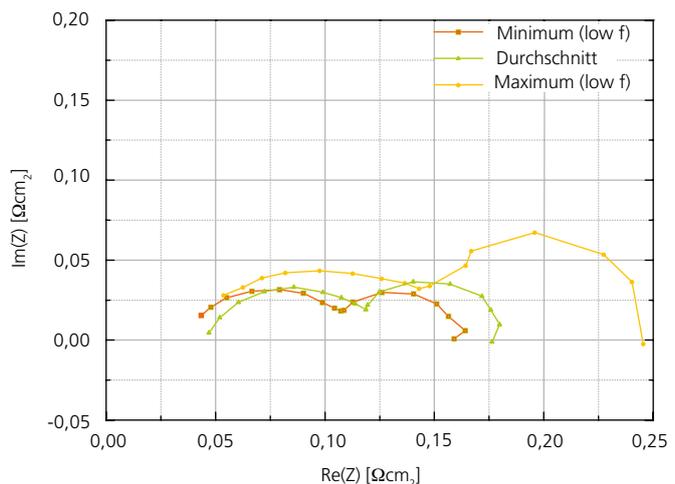
Automobile Brennstoffzellen haben vergleichsweise große Zellflächen und werden bei hohen Stromdichten bis zu 3 A/cm² betrieben. Dies hat große Inhomogenitäten innerhalb der aktiven Fläche zur Folge, bedingt durch die Abreicherung der Reaktionsgase sowie die Temperatur- und Feuchtezunahme aufgrund der elektrochemischen Reaktion. Um diese lokalen Effekte wissenschaftlich zu charakterisieren, setzen wir eine weltweit einzigartige Mehrkanal-Impedanz-Anlage und segmentierte Brennstoffzellen ein. Des Weiteren untersuchen wir automobiler Brennstoffzellen-Short-Stacks in der Klimakammer, wobei wir simultan das Verhalten aller Einzelzellen mit Hilfe der elektrochemischen Impedanzspektroskopie überwachen.

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

In unserer Kooperation mit der Automotive Fuel Cell Corporation AFCC in Vancouver, die im Daimler-Konzern die Entwicklung von Brennstoffzellen verantwortet, haben wir eine Einzelzelle der 4. Generation von 2009 in 68 elektrisch voneinander isolierte Segmente unterteilt. In jedem Segment können wir gleichzeitig im potentiostatischen Betrieb den Strom messen und elektrochemische Impedanzspektren aufnehmen. Damit untersuchen wir den lokalen Betriebszustand in Abhängigkeit von der Spannung, der Stöchiometrie und der Feuchte der Reaktionsgase sowie der Betriebstemperatur jeweils bei Start, Stopp und Lastsprüngen. Die Ergebnisse werden für die Modellvalidierung, die Optimierung der Betriebsführung und konstruktive Verbesserungen genutzt.

Gleichzeitig charakterisieren wir einen Brennstoffzellen-Short-Stack der gleichen Generation in unserer begehbaren Klimakammer. Insbesondere können wir die Einzelzellen elektrisch kontaktieren und nicht nur die Einzelzellspannung erfassen,

- 1 68-Kanal-Impedanz-Anlage zur orts aufgelösten Charakterisierung von segmentierten Brennstoffzellen.
- 2 Teststand mit Mehrkanal-Impedanz-Anlage zur Brennstoffzellen-Stack- und Systemcharakterisierung in der Klimakammer.



- 3 Charakterisierung eines automobilen Brennstoffzellen-Stacks hinsichtlich der Einzelzell-Impedanzspektren.

sondern auch simultan an allen Zellen die elektrochemischen Impedanzspektren messen. Ziel der Versuche ist, die Effekte auf Einzelzellebene im stationären sowie dynamischen Betrieb in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen eines Stacks zu analysieren. Darüber hinaus ermöglicht uns der Vergleich der Ergebnisse von segmentierter Einzelzelle und Stack ein besseres Verständnis der Zusammenhänge zwischen lokalen Phänomenen und dem Betriebszustand des kompletten Stacks.

Unsere Arbeiten werden von der Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt.

SYSTEMINTEGRATION UND NETZE – STROM, WÄRME, GAS



Die Transformation unseres Energiesystems in eine CO₂-reduzierte Energieversorgung stellt uns vor gewaltige innovative Herausforderungen. Die Energieszenarien der letzten Jahre haben gezeigt, dass diese große Aufgabe nur durch die geeignete Kombination und Integration verschiedener Energiesysteme und Netzstrukturen erreicht werden kann. Im Bereich der Stromnetze wird seit einiger Zeit das Smart Grid diskutiert, das ein optimales Zusammenspiel von Energiesystemen im liberalisierten Energiemarkt ermöglichen soll. Das Fraunhofer ISE forscht im Bereich der Smart Grids und bezieht dabei zunehmend die Integration der typischen Energiesparten »Strom, Wärme und Gas« mit in das optimale Zusammenspiel ein.

Die Integration von Strom- und Wärmesektor ermöglicht den Ausgleich der hohen Fluktuation im Stromnetz, die durch den Eintrag von erneuerbaren Energien entsteht. Dabei wird z. B. die Stromerzeugung von Strom-Wärme-geführten Kraft-Wärme-Kopplung (KWK)-Systemen in die abendliche Lastspitze verschoben, oder auch die thermische Wandlung von Überschussstrom mit Wärmepumpen und elektrischen Heizstäben in Wärme genutzt. Die Betriebsführungssysteme spielen hierbei eine zentrale Rolle, denn es geht nicht nur um zeitgerechte Bereitstellung von Strom und Wärme, sondern auch um die vorausschauende Bewirtschaftung von Speichersystemen. So kommen heute schon virtuelle Kraftwerke zum Einsatz, die eine Optimierung der Stromproduktion mit thermischen Pufferspeichern bewerkstelligen, indem die Spotmarktpreise und Wettervorhersagen für die Betriebsoptimierung zugrunde gelegt werden. Das Fraunhofer ISE entwickelt hierzu mit dem »OpenMUC Gateway« die entsprechende Technologie, internetvernetzte Energieanlagen optimal ins Gesamtsystem zu integrieren.

Im Bereich der Quartierskonzepte liegt der Fokus unserer Forschungsarbeiten bei den Wärmenetzen, die eine Einbindung von Blockheizkraftwerk (BHKW)-Systemen und thermischen Speichern ermöglichen. Zielsetzung ist hierbei, eine primär-energetische Versorgungsoptimierung unter Berücksichtigung der ökonomischen Faktoren für den urbanen Raum zu entwickeln. Ein noch umfassenderes Bild liefern die Smart Energy Cities. Sie zielen auf eine gesamtheitliche Optimierung des urbanen Raums ab, indem die Versorgungsstruktur und das Mobilitätskonzept den Anforderungen aus der erneuerbaren Energiebereitstellung angepasst werden.

Für alle Themenbereiche des Geschäftsfelds stellt die Modellierung und Simulation von Energiesystemen und

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

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

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt 67

Mitarbeiter vollzeitäquivalent 52

Zeitschriften- und Buchbeiträge 14

Vorträge und Konferenzbeiträge 20

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

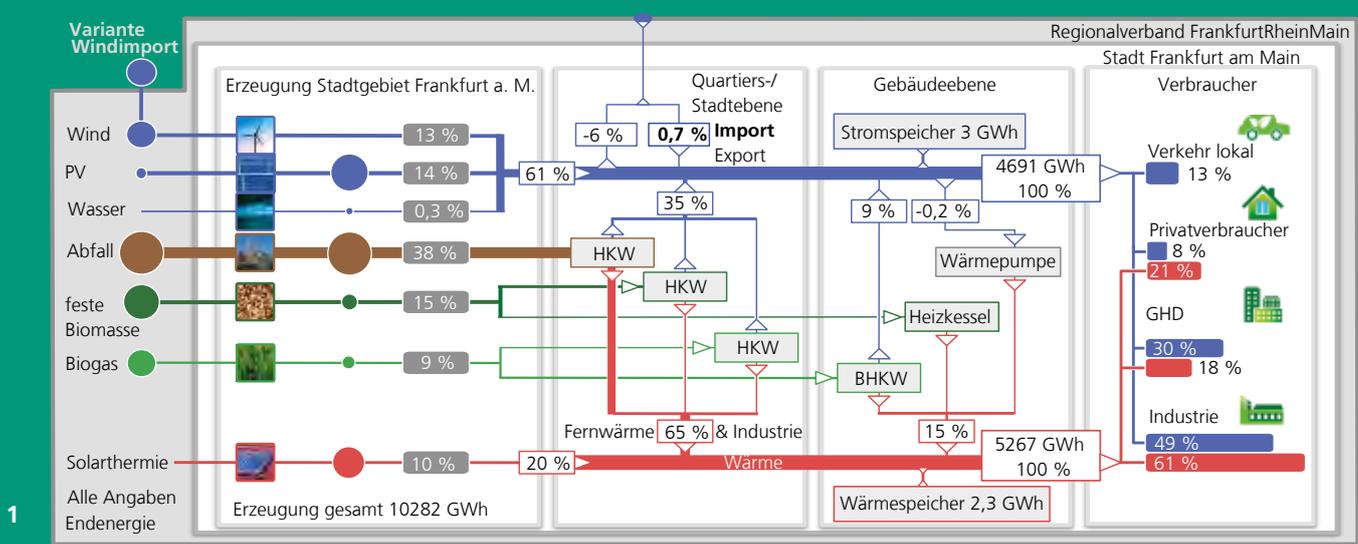


© Rolf Diech SolarArchitektur

Das Sonnenschiff ist das Dienstleistungszentrum der Solarsiedlung in Freiburg – und der erste Gewerbebau in Plusenergiebauweise.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination	Prof. Dr.-Ing. Christof Wittwer	Telefon +49 761 4588-5115 christof.wittwer@ise.fraunhofer.de
Betriebsführung von Energieversorgungssystemen	Dipl.-Ing. Sebastian Herkel	Telefon +49 761 4588-5117 sys.operation@ise.fraunhofer.de
Smart Energy Cities	Dipl.-Phys. Gerhard Stryi-Hipp	Telefon +49 761 4588-5686 sys.sec@ise.fraunhofer.de
Quartierskonzepte und Wärmenetze	Dipl.-Phys. Gerhard Stryi-Hipp	Telefon +49 761 4588-5686 sys.quartiers@ise.fraunhofer.de
Elektrische Verteilnetze und Betriebsmittel	Dr.-Ing. Bernhard Wille-Haußmann	Telefon +49 761 4588-5443 sys.smartgrid@ise.fraunhofer.de
IKT für Komponenten im Smart Grid	Dr. Robert Kohrs	Telefon +49 761 4588-5708 sys.ict@ise.fraunhofer.de
Power-to-Gas	Dr. Christopher Hebling	Telefon +49 761 4588-5195 sys.ptg@ise.fraunhofer.de
Energetische Biomassenutzung	Dr.-Ing. Achim Schaadt	Telefon +49 761 4588-5428 sys.biomass@ise.fraunhofer.de
Autonome Stromversorgungen und Inselnetze	Dr. Matthias Vetter	Telefon +49 761 4588-5600 sys.ugrids@ise.fraunhofer.de
Solare Entsalzung	Dr.-Ing. Joachim Koschikowski	Telefon +49 761 4588-5294 sys.water@ise.fraunhofer.de



SIND NACHHALTIGE ENERGIESYSTEME FÜR UNSERE STÄDTE MÖGLICH?

Immer mehr Städte setzen sich ein nachhaltiges Energiesystem auf Basis erneuerbarer Energien zum Ziel. Doch wie kann ein Zielenergiesystem konkret aussehen, das von hohen Anteilen fluktuierender Energieerzeugung und dynamischen Komponenten wie Speichern geprägt ist und erst in 20 oder 30 Jahren unter deutlich veränderten Rahmenbedingungen erreicht werden kann? Am Fraunhofer ISE wurde das »Kommunale Energiesystemmodell« (KomMod) entwickelt, das zeitlich hochaufgelöst kommunale und regionale Energiesysteme ökonomisch oder ökologisch optimiert und dabei Strom, Wärme, Kälte und lokalen Verkehr berücksichtigt. Mit »KomMod« wurde berechnet, wie sich die Stadt Frankfurt am Main im Jahr 2050 zu 100 % mit erneuerbaren Energien versorgen kann.

Jan-Bleicke Eggers, Sebastian Herkel, Annette Steingrube, **Gerhard Stryi-Hipp**, Hans-Martin Henning

Die Elemente eines nachhaltigen kommunalen Energiesystems sind bekannt: hohe Effizienz in Erzeugung und Verbrauch, Nutzung lokaler erneuerbarer Energien (EE) und Flexibilisierung durch Smart Grid und Speicher. Für mittlere und große Städte reichen die lokalen EE-Potenziale nicht aus, deshalb sind Energiekooperationen von Stadt und Region notwendig. Die optimale Konfiguration des Energiesystems, die Versorgungssicherheit zu jeder Stunde gewährleistet und die Wechselwirkungen von Strom, Wärme und Verkehr berücksichtigt, muss berechnet werden. Die Randbedingungen im Zieljahr, wie Stand der Sanierung, Demografie, Wirtschaft und Technologie, müssen vorgegeben werden. Weiter sind Import- und Exportbegrenzungen sowie das Einzugsgebiet zu definieren.

1 Energieszenario für Frankfurt am Main für das Jahr 2050, berechnet mit »KomMod«. Die Versorgung mit erneuerbaren Energien (inklusive Abfall) aus der Stadt Frankfurt und der Region FrankfurtRheinMain (grau hinterlegt) sowie für Windstrom teilweise aus einer größeren Region, ist bei einer Stromspeicherkapazität von 3 GWh mit einem Reststromimport von 0,7 % möglich. Die Größe der Kreisflächen entspricht den Beiträgen der einzelnen Energiequellen (HKW = Heizkraftwerk).

Die Stadt Frankfurt am Main will sich bis zum Jahr 2050 vollständig mit EE aus der Stadt und der Region versorgen. Mit »KomMod« wurde berechnet, dass die Vollversorgung möglich ist, wenn die EE-Potenziale der Stadt vollständig und die der Region in Teilen genutzt werden. Möglich ist sogar die Autarkie. Effizienter, kostengünstiger und flexibler ist es jedoch, Import und Export von Strom in bestimmten Grenzen zuzulassen. Die berechnete Lösungsvariante ist in Abb. 1 dargestellt.

Bemerkenswert ist der große Anteil der energetischen Nutzung von Abfall, der aus der Region bezogen und in Frankfurt verbrannt wird, sowie der geringe Windanteil aufgrund des geringen Potenzials. Durch andere Vorgaben verschieben sich deren Anteile deutlich. »KomMod« ermöglicht, die Zusammenhänge zwischen Vorgaben und resultierenden Lösungen zu untersuchen.

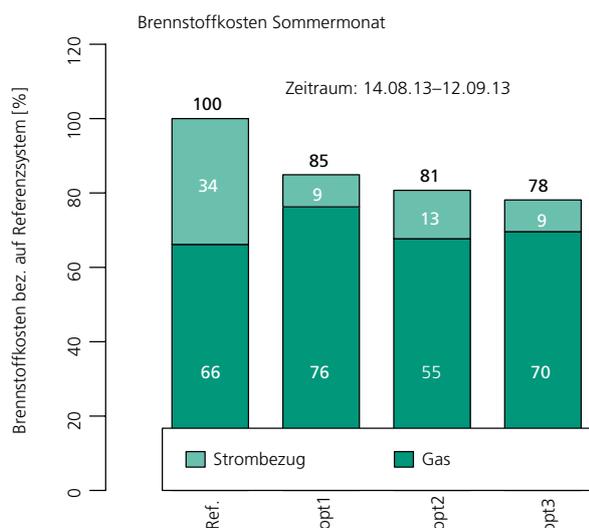


2

FLEXIBILISIERUNG VON WÄRME-, KÄLTE- UND STROMVERSORGUNG

Die Energieversorgung von gewerblichen Liegenschaften kann so gestaltet werden, dass die aktuelle Verfügbarkeit von Wind- und Sonnenstrom berücksichtigt wird. Anlagensysteme mit Kraft-Wärme-Kälte-Kopplung (KWKK) sind hierzu gut geeignet, da sie – je nach Bedarf – sowohl Strom vom Netz beziehen als auch lokal produzieren können. Für eine gewerbliche Liegenschaft mit KWKK entwickeln und testen wir ein Kältespeicherkonzept, welches eine effiziente Wärme-, Kälte- und Stromversorgung und eine bevorzugte Nutzung regenerativen Stroms ermöglicht. Um den beschränkten Bauraum für den Speicher optimal auszunutzen, kommt ein Phasenwechselmaterial (PCM) mit einer sehr hohen Energiedichte zum Einsatz.

Stefan Gschwander, Sebastian Herkel, Doreen Kalz, Konstantin Klein, Martin Sonntag, Hans-Martin Henning



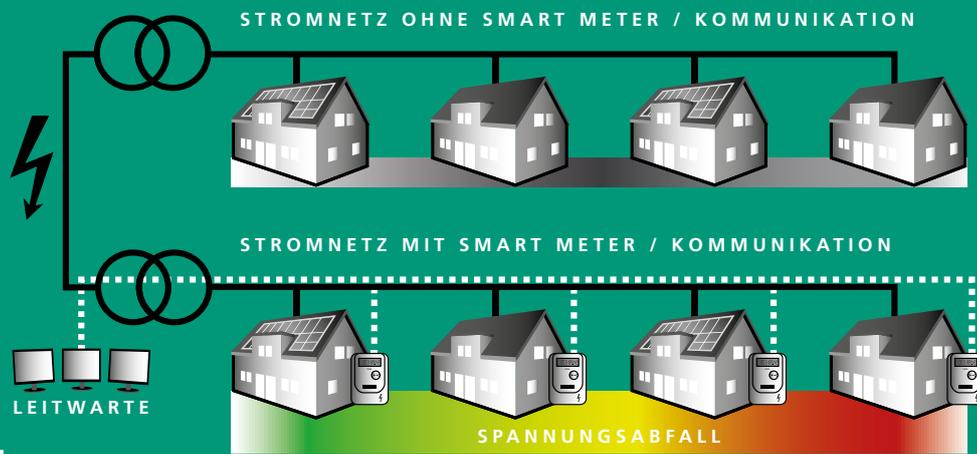
3 *Simulierte Betriebskosten der Liegenschaft in einem Sommermonat. Ref: Bestandssystem, opt1: Angepasste BHKW-Regelung, opt2: Verbesserte Nutzung der BHKW-Abwärme in Absorptionskältemaschine, opt3: System mit PCM-Kältespeicher.*

1 *Absorptionskältemaschine, die ungenutzte BHKW-Wärme als Antriebswärmestrom nutzen und in Kälte umwandeln kann.*

2 *Kompressionskältemaschine, die elektrischen Strom zur Kälteerzeugung nutzt.*

Bei dem untersuchten System handelt es sich um eine Anlage mit drei Blockheizkraftwerken (BHKW) mit je 420 kW_{el}, einem Spitzenlast-Gaskessel sowie einer Absorptions- und einer Kompressionskältemaschine. Aufgrund der eingesetzten Technologien ergibt sich eine hohe wechselseitige Beeinflussung der unterschiedlichen Wärme-, Kälte- und Stromerzeuger.

Um eine bessere Einsicht in den Anlagenbetrieb zu gewinnen und die Anforderungen an den Speicher in dem untersuchten Energieversorgungssystem konkretisieren zu können, wird seit August 2013 ein umfassendes Langzeitmonitoring mit hoher zeitlicher Datenaufösung durchgeführt. Die gewonnenen Daten dienen einerseits zur Betriebsanalyse und andererseits zur Kalibrierung und Validierung von dynamischen Simulationsmodellen der Anlage, die wir für die Entwicklung eines optimierten Betriebs- und Speicherkonzepts nutzen. Dieses sieht u. a. einen 30 m³ großen Salzhydrat-Phasenwechselspeicher vor. Gegenüber herkömmlichen Wasserspeichern liegt der Vorteil dieses Speichers in der höheren Energiedichte und somit kompakteren Bauform. Da die Platzverhältnisse vor Ort stark beschränkt sind, kann mit der Phasenwechsel-Technologie eine größere Kältemenge gespeichert werden. Nach Implementierung des Speichers wird sein Verhalten im realen Anlagenbetrieb messtechnisch begleitet. Die gewonnenen Erkenntnisse fließen in die Weiterentwicklung von PCM-Speichern ein. Darüber hinaus analysieren wir die anlagen- und regelungstechnischen Voraussetzungen für die erfolgreiche Integration von Kältespeichern in gewachsene Bestandsanlagen und für einen netzdienlichen Betrieb.



1

OPTIMIERUNG DER AUSLASTUNG VON VERTEILNETZEN DURCH SMART METER

Ein Element in den Stromnetzen der Zukunft sind intelligente Stromzähler, sogenannte Smart Meter. Aufgrund einer Gesetzesänderung müssen künftig Smart Meter in allen Haushalten mit Elektrofahrzeugen, Erzeugungsanlagen, einem Verbrauch von über 6000 kWh und in Neubauten installiert werden. Die Smart Meter visualisieren für die Bewohner den Verbrauch und sollen zum Energiesparen motivieren. Über den Smart Meter sind die Verbraucher kommunikativ mit dem Netzbetreiber verbunden, wodurch Anreize gesetzt werden können, den Stromverbrauch in Zeiten hoher Erzeugung aus erneuerbaren Energien zu verschieben. Außerdem kann der Stromnetzbetreiber mit den nun verfügbaren Messungen das Netz besser steuern.

Wolfgang Biener, **Bernhard Wille-Haußmann**,
Christof Wittwer, Günther Ebert

Das Smart Meter System hat als Kernstück ein Smart Meter Gateway, das die Kommunikation der angeschlossenen Geräte untereinander und nach außen ermöglicht. An jedes Gateway sind Messgeräte angeschlossen, um die mit dem Netz ausgetauschte Leistung und die Spannung aufzuzeichnen. Je nach Verfügbarkeit sind auch steuerbare Komponenten eingebunden, z. B. Elektrofahrzeuge, Wärmepumpen und Erzeugungsanlagen. Da über den Stromverbrauch Schlüsse auf die Gewohnheiten der Bewohner des Hauses möglich sind, werden die Smart Meter vom Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik zertifiziert.

Über das Smart Meter Gateway kann der Netzbetreiber die Messgeräte auslesen und die angeschlossenen Anlagen, soweit mit dem Kunden vereinbart, regeln. Auf Basis der erhaltenen Informationen hat der Netzbetreiber dann die Möglichkeit, den Netzzustand zu berechnen. Abb.1 zeigt zwei Netzabschnitte im Vergleich. Der obere stellt die

1 Es werden zwei Niederspannungsnetze dargestellt. Im oberen Netz werden keine Smart Meter verwendet, sodass der Zustand des Netzes unbekannt ist. Das untere Netz ist mit Smart Metern ausgestattet und es kann deshalb von der Leitwarte aus beobachtet und bei Bedarf regelnd eingegriffen werden.

heutige Situation ohne Smart Meter und mit unbekanntem Netzzustand dar. Der untere bildet ein zukünftiges Stromnetz mit Smart Metern ab, in dem auch der Spannungsabfall entlang des Netzausläufers sichtbar wird. Das Wissen über den aktuellen Netzzustand ermöglicht es dem Netzbetreiber, angeschlossene Geräte effizienter zu steuern und so die Netze entsprechend ihrem technischen Limit optimal auszunutzen. Z. B. wird Blindleistung verwendet, um die Spannung im Stromnetz zu regeln. Dies verursacht allerdings Verluste im Netz. Studien haben gezeigt, dass mittels der Daten aus Smart Metern die Regler der Blindleistungseinspeisung so spezifisch parametrieren werden können, dass diese Verluste um bis zu 50 % gegenüber sonst typischen Standardeinstellungen reduziert werden können. Zudem kann bewertet werden, ob ein Netzausbau aufgrund neu angeschlossener Erzeuger und Verbraucher notwendig ist. Ein Nachteil der Smart Meter sind ihre verhältnismäßig hohen Kosten. Aktuell wird wissenschaftlich diskutiert, ob Kosten und Nutzen in einem angemessenem Verhältnis zueinander stehen.



REGIONALE BETREIBERMODELLE FÜR DEZENTRALE ENERGIEANLAGEN

Dezentrale Energieerzeugungsanlagen sowie Speicher erlauben eine Umsetzung verschiedener Betreibermodelle. Mit der SWW Wunsiedel GmbH entwickelt das Fraunhofer ISE gegenwärtig die »Energiebox«. Die Energiebox besteht aus einer – räumlich konzentrierten – Kombination der Funktionen Erzeugung bzw. Speicherung von Strom und Wärme, Lieferung und Bezug, fernauslesbarer Messung und Überwachung in Echtzeit, lokal gekoppelt und aufeinander abgestimmt. Das Fraunhofer ISE konzipiert gemeinsam mit seinem Spin-Off Enit Solutions GmbH und weiteren externen Partnern die kommunikative Anbindung, die mögliche Ausgestaltung, simuliert und evaluiert verschiedene Varianten und trägt durch Optimierungsalgorithmen zur kosteneffizienten Betriebsführung bei. Übergeordnetes Ziel ist, die Akzeptanz und – aufgrund der räumlichen Nähe – einen potenziell sparsameren energetischen Umgang der teilnehmenden Verbraucher zu untersuchen.

Pascal Benoit, **Sebastian Gölz**, Raphael Hollinger, Niklas Kreifels, Günther Ebert



2 Bietet die Energiebox den Nutzern das Gefühl, sich aktiv an der Energiewende zu beteiligen? Ist ein solches Betreibermodell für Stadtwerke lukrativ?

1 Luftaufnahme von Wunsiedel.

Die Energiebox umfasst mehrere Erzeugungsanlagen (BHKW, PV), Speicher, Steuerungs- und Kommunikationselemente. Sie befindet sich in kompakter Bauweise im engen räumlichen Zusammenhang mit einer Gruppe von Wohngebäuden (ca. 30 Anschlussnehmer), deren Strom- und Wärmebedarf auf Basis regenerativer Energieträger gedeckt und damit das übergeordnete regionale Gesamtversorgungssystem der SWW Wunsiedel GmbH direkt entlastet werden soll. Das Fraunhofer ISE trägt zum einen zur simulativen Abbildung und Modellierung der Erzeuger und Verbraucher der Energiebox bei. Zum anderen erfolgt die tatsächliche Implementierung eines fernauslesbaren Mess- und Überwachungssystems zur Erfassung und Speicherung der realen Erzeugungs- und Verbrauchsdaten gemeinsam mit unserem Spin-Off Enit Solutions GmbH. Die Energiebox ermöglicht den teilnehmenden Haushalten eine engere Beziehung zur Energieproduktion sowie zum Energieverbrauch und somit zu einem bewussteren Umgang mit Energie. Um die optimale Ausschöpfung lokaler bzw. regionaler Erzeugung weiter zu unterstützen, ist eine zusätzliche preisliche Gestaltung geplant. Ziel ist, die Tarif- / Preisstruktur so zu gestalten, dass die Gesamtkosten für die Teilnehmer stabil bleiben, gleichzeitig aber der Betrieb der lokalen Erzeugung kostendeckend betrieben werden kann. Neben Eigenstrom kann die Energiebox auch Strom aus dem übergeordneten Netz aufnehmen oder an dieses abgeben. Dieser Gestaltungsaspekt ermöglicht der SWW Wunsiedel GmbH, die Betreiber der Energiebox ist, die Erschließung weiterer Effizienzpotenziale im Wunsiedler Verteilungsnetz. Hier betreibt die SWW Wunsiedel GmbH weitere Erzeugungsanlagen bzw. bindet sie als EEG-Anlagen ein.

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

www.energiewende-akzeptanz.de



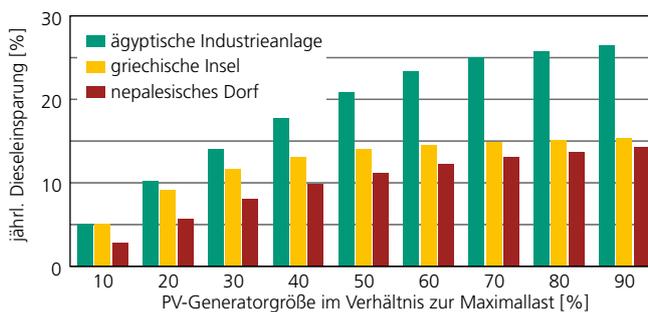
DIESELEINSPARPOTENZIAL DURCH PV-INTEGRATION IN DIESELNETZE

Weltweit werden in Regionen ohne Netzanschluss viele Dörfer, Städte, Inseln und Industriebetriebe mit Strom aus Dieselgeneratoren versorgt. Das Ersetzen dieser Dieselgeneratoren durch Photovoltaik (PV)-Inselssysteme wird trotz langfristiger Kosteneinsparungen nach wie vor durch die hohen Anfangsinvestitionen erschwert. Neue Ansätze erlauben jedoch die Gesamtinvestition für PV-Inselanlagen nicht auf einmal, sondern in kleinen Schritten durchzuführen. Unsere Simulationstools können das Dieseleinsparpotenzial und die solare Deckungsrate dieser schrittweisen Integration von zuerst netzgekoppelten PV-Anlagen, die Erweiterung mit PV und »Fuel Saver« sowie dem von uns entwickelten Energiemanagementsystem zur Optimierung des Gesamtsystems darstellen.

Björn Bayer, Georg Bopp, **Alexander Schies**, Matthias Vetter, Günther Ebert

Die Einsparung von Diesel in dieselgeführten netzunabhängigen Stromversorgungen beginnt mit der Steigerung der Energieeffizienz und der Einführung eines Generatormanagements. Der nächste Schritt ist die Einbindung von netzgekoppelten PV-Systemen. Dies kann nur bis zu einem sehr begrenzten PV-Anteil erfolgen, um die Netzstabilität weiterhin zu gewährleisten. Zur Erhöhung des PV-Stroms in einem Dieselnetz muss ein sogenannter Fuel Saver integriert werden. Dieser regelt die PV-Anlage gegebenenfalls ab, sodass der Dieselgenerator immer mit einer vorgegebenen Mindestlast läuft. Ziel unseres Energiemanagementsystems (EMS) ist, durch eine Direktnutzung der PV-Energie eine Abregelung zu vermeiden und die Dieselgeneratoren so effizient wie möglich zu betreiben, um den Dieselverbrauch zu minimieren. Dies erreichen wir, indem unser Lastmanagement unterschiedliche verschiebbare und schaltbare oder variable Lasten wie Kühllasten oder Pumpen – durch einen Algorithmus optimiert – über den

1 *Dieselgenerator zum Betrieb einer Pumpstation nahe Assuan in Ägypten. Schon nach wenigen Jahren rentieren sich PV-Generatoren, die Dieselkraftstoff und damit Kosten einsparen. Neue Konzepte wie Fuel Saver und Energiemanagementsysteme erlauben eine sukzessive Einführung von PV auch ohne Batterie. Dadurch verringern sich die Anfangsinvestitionen enorm.*



2 *Dieseleinsparpotenziale in dieselgeführten Inselssystemen mit PV und Fuel Saver. Ab einer gewissen Größe der PV-Anlage tritt eine Sättigung ein, überschüssige PV-Energie wird abgeregelt, da kein Speicher vorhanden ist und am Dieselgenerator eine Mindestlast anliegen muss. Unser Energiemanagementsystem kann diese Sättigungsgrenze weiter nach oben schieben, sodass mehr PV bei gleicher installierter Leistung genutzt werden kann.*

Tag betreibt, sodass die erzeugte PV-Energie optimal genutzt werden kann. Um Dieseleinsparpotenziale aufzuzeigen, haben wir eine Simulationsumgebung in Matlab® aufgebaut, die Dieselgeneratoren, PV, Fuel Saver, Lasten und EMS beinhaltet. Anhand dreier Fallstudien (einer ägyptischen Industrieanlage, einer griechischen Insel und einem nepalesischem Dorf) haben wir Dieseleinsparungen im Fuel Saver-Betrieb zwischen 5 % und 30 % errechnet. Mit unserem Lastmanagement ergaben sich zusätzlich je nach vorhandenen Lasten Einsparpotenziale von 6 % bis 15 %. Höhere Einsparungen für Fuel Saver und EMS sind bei einer sehr guten Übereinstimmung des Last- mit dem Solarprofil möglich.

ENERGIESYSTEMANALYSE



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

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

Aus dieser Veränderung ergeben sich neue Forschungsfragen, die hauptsächlich auf die Integration der erneuerbaren Energien in das Gesamtsystem abzielen: Wie ist eine kosteneffiziente Nutzung erneuerbarer Energieressourcen in verschiedenen Regionen zu erreichen? Wie können verschiedene Technologien miteinander kombiniert werden, um den Energiebedarf am kosteneffizientesten sicherzustellen? Wie wird sich das Energiesystem insgesamt entwickeln? An welchen Stellen muss diese Entwicklung durch den Staat unterstützt werden? Wir bieten für diese Fragestellungen eine Reihe von Lösungen, die in den folgenden Geschäftsfeldthemen angesiedelt sind:

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

Am Fraunhofer ISE werden verschiedene Energietechnologien unter technischen und ökonomischen Gesichtspunkten analysiert, wie beispielsweise anhand von Stromgestehungskosten.

Durch die Betrachtung des Zusammenspiels der Komponenten kann der Einsatz erneuerbarer Technologien für einen Kraftwerkspark oder ein Land hinsichtlich bestimmter Zielkriterien optimal ausgelegt werden. Das Geschäftsfeld Energiesystemanalyse bietet unterschiedliche methodische Ansätze: Zum einen kann für ein bestimmtes CO₂-Minderungsziel ein sektorübergreifendes Zielsystem nach minimalen volkswirtschaftlichen Kosten ermittelt werden. Zum anderen kann durch ein Investitionsentscheidungsmodell aufgezeigt werden, wie sich das Energiesystem unter bestimmten Rahmenbedingungen entwickelt und wie das Zusammenspiel der Komponenten im Energiesystem funktioniert. Somit bieten unsere Modelle eine fundierte Grundlage für Entscheidungen über die Rahmenbedingungen einer zukünftigen Energieversorgung.

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

WEITERE INFORMATIONEN



Mitarbeiter gesamt	34
Mitarbeiter vollzeitäquivalent	24
Zeitschriften- und Buchbeiträge	10
Vorträge und Konferenzbeiträge	26

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



© A. Aleksandravicius / shutterstock.com

Pumpspeicherkraftwerk in Rönkhausen mit einer Leistung von 140 MW.

ANSPRECHPARTNER

Geschäftsfeldkoordination

Dr. Thomas Schlegl

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

Techno-ökonomische Bewertung von Energietechnologien

Dipl. Wi.-Ing. Christoph Kost

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

Marktanalysen und Geschäftsmodelle

Noha Saad Hussein M. Sc.

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

Kraftwerkseinsatzplanung und Betriebsstrategien

Dr.-Ing. Niklas Hartmann

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

Nationale und regionale Energieversorgungskonzepte

Charlotte Senkpiel M. Eng.

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

Modellierung von Energieversorgungsszenarien

Prof. Dr. Hans-Martin Henning

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



© iStock.com / jnvisual

TRANSFORMATIONSPFADE DER DEUTSCHEN ENERGIEVERSORGUNG

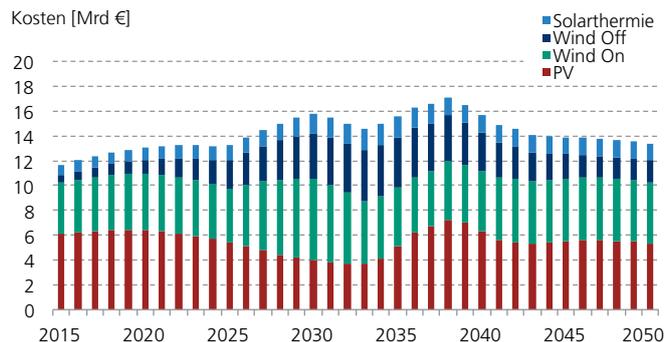
Optimierungsrechnungen mit dem am Fraunhofer ISE entwickelten Modell »REMod-D« haben gezeigt, wie eine kostenoptimale Energieversorgung aussehen kann, mit der das Ziel einer 80 prozentigen Reduktion der energiebedingten CO₂ Emissionen im Jahr 2050 erreicht wird. Der aktuelle Forschungsschwerpunkt widmet sich nun den Fragen: Wie ist dieses Ziel im zeitlichen Verlauf erreichbar und was kostet die Umstellung von heute bis ins Jahr 2050? Hierzu wurde der derzeitige Anlagenbestand und der mögliche Ausbau bis zum Jahr 2050 hinsichtlich der Kosten und des Umfangs analysiert. Es zeigt sich, dass die Umstellung zunehmend Kosten einspart und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern massiv reduziert.

Benjamin Köhler, **Andreas Palzer**, Karoline Preiser, Hans-Martin Henning

Das zentrale Ziel der Energiewende in Deutschland ist eine drastische Absenkung der Treibhausgas-Emissionen. Bis zum Jahr 2050 sollen diese um mindestens 80 % der Emissionen im Jahr 1990 abgesenkt werden. Ergebnisse aus Berechnungen mit unserem Modell »REMod-D« zeigten, dass dies durch den Ausbau von Photovoltaik (PV) auf ca. 150 GW_{el}, Windkraftanlagen (WKA) von ca. 150 GW_{el} (onshore und offshore) und Solarthermieranlagen (STA) von ca. 70 GW_{th} in Verbindung mit anderen Maßnahmen im Bereich der effizienten Energienutzung sowie weiteren Systemkomponenten wie Speichern und Kraft-Wärme-Kopplung möglich ist.

Ausgehend von der 2013 installierten Leistung dieser Anlagen (ca. 36 GW_{el} PV, 33 GW_{el} WKA und 10 GW_{th} STA) müssen bis 2050 jährlich zwischen 10 und 17 Mrd € in Neubau und Repowering investiert werden (Abb. 1). Die kumulierten Ausgaben (ohne Kapitalkosten und ohne den Ausbau von notwendigen Übertragungsnetzen) belaufen sich bei diesem

- 1 Großflächen-Photovoltaik-Anlage.
- 2 Spiegelung von Windrädern in Solarzellen.



- 3 Notwendige jährliche Investitionen in erneuerbare Energien zur Erreichung des Zielsystems mit 150 GW_{el} Photovoltaikanlagen, 150 GW_{el} Windkraftanlagen und 70 GW_{th} Solarthermie (PV: Photovoltaik, Wind: Windkraftanlage, on: onshore, off: offshore).

Szenario auf ca. 512 Mrd €. Gleichzeitig werden durch die zunehmende Substitution fossiler Energieträger die Importabhängigkeit reduziert und die Kosten für den Kauf fossiler Energie vermieden. Unter der Annahme konstanter Preise für fossile Energieträger werden durch den Ausbau der erneuerbaren Energien bis in das Jahr 2050 Ausgaben von ca. 660 Mrd € (bei einer Steigerung um 2 % ca. 1045 Mrd €) vermieden. Der zunächst hohe finanzielle Aufwand für die Umstellung des Energiesystems wird somit durch vermiedene Kosten für fossile Energieträger kompensiert und führt im Verlauf der Zeit zu einem kostengünstigeren Energiesystem.



1

© A. Aleksandravicius / shutterstock.com

BETREIBERMODELLE FÜR STROMSPEICHER

In Deutschland deckt der Strom aus regenerativen Energien bereits über ein Viertel des Verbrauchs. Als Herausforderung für Wissenschaft und Wirtschaft zeigt sich jedoch die schwankende Verfügbarkeit des Stroms aus erneuerbaren Energien. Umso wichtiger wird es zukünftig sein, Möglichkeiten bereitzustellen, um Energie zu speichern. Das Projekt »Betreibermodelle für Stromspeicher« vom Fraunhofer ISE, dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) sowie Compare Consulting befasst sich mit der beschriebenen Problematik aus technischer, ökonomischer, ökologischer und sozialer Perspektive. Ziel ist, Betreibermodelle für den rentablen Einsatz von Speicherkraftwerken in Baden-Württemberg zu entwickeln.

Niklas Hartmann, **Verena Jülch**, Jessica Thomsen, Thomas Schlegl

In Deutschland sind heute über 30 Pumpspeicherkraftwerke im Einsatz. Aufgrund der wirtschaftlichen Rahmenbedingungen werden derzeit geplante Projekte jedoch abgebrochen und über die Stilllegung im Betrieb befindlicher Kraftwerke diskutiert. Ebenso lassen sich Investitionen in Batteriespeicher derzeit nur schwer wirtschaftlich darstellen, weshalb diese bei der Anwendung in Haushalten mittlerweile staatlich gefördert werden. Für erneuerbare Energietechnologien gibt es vielfältige Betreibermodelle, z. B. Energiegenossenschaften oder Contracting-Modelle, durch die der Einsatz der Technologien in den letzten Jahren stark angewachsen ist. Für Stromspeicher gibt es auf dieser Ebene bisher wenige innovative Modelle.

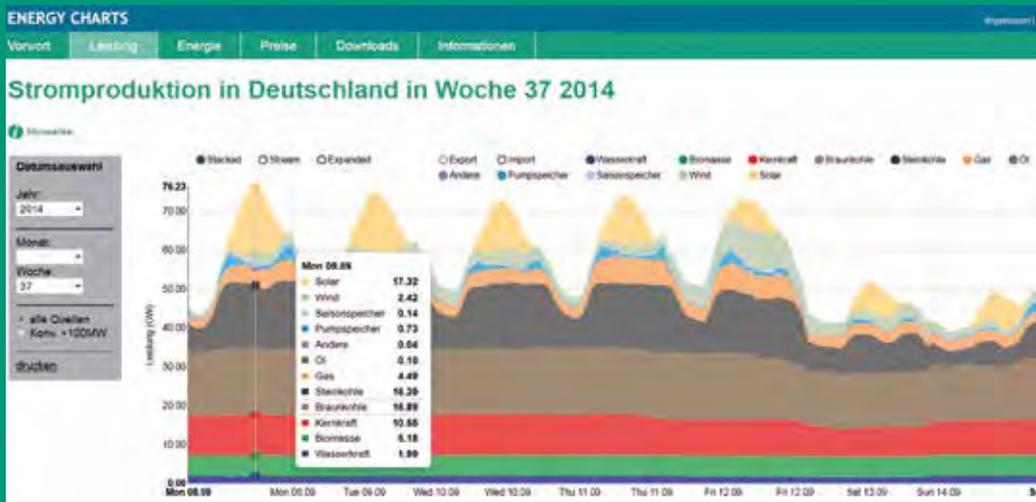
Das Projekt »Betreibermodelle für Stromspeicher« vom Fraunhofer ISE, dem Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung (IER) der Universität Stuttgart sowie Compare Consulting knüpft an diese Problematik an und zielt darauf ab, Betreibermodelle für den rentablen Einsatz von

1 *Pumpspeicherkraftwerk in Rönkhausen mit einer Leistung von 140 MW.*

Speicherkraftwerken in Baden-Württemberg zu entwickeln. Hierbei gehen wir auf vier wichtige Arten von Anforderungen an die Speicher ein: technische, wirtschaftliche, ökologische und soziale Anforderungen.

Im Projekt werden verschiedene Versorgungsaufgaben für Stromspeicher untersucht. Diese reichen vom Einfamilienhaus, für das z. B. der Eigenstromanteil erhöht werden soll, über eine Gemeinde, die sich autark versorgen möchte, bis hin zum Land Baden-Württemberg, bei dem z. B. die Sicherung der Systemstabilität an erster Stelle steht. Aus den verschiedenen Aufgaben ergeben sich für die Speicher unterschiedliche technische Konfigurationen hinsichtlich Größe und Fahrweise. Ökonomische Berechnungen werden für verschiedene Konfigurationen und Betreibermodelle, vom Hausbesitzer über Contracting bis hin zu Genossenschaftsmodellen, durchgeführt, um deren Wirtschaftlichkeit zu bestimmen. Zudem werden die zu erwartenden Umwelteinflüsse der Speichertechnologien mittels LCA-Analyse ermittelt. Um Bevölkerung und potenzielle Investoren sowie andere Interessensgemeinschaften in den Entwicklungsprozess einzubeziehen, werden projektbegleitend drei Workshops durchgeführt. Auf diese Weise wird die Grundlage für die ökonomische, ökologische und sozialverträgliche Entwicklung von Speicherprojekten in Baden-Württemberg geschaffen.

Das Projekt wird vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg unterstützt.



ISE »ENERGY CHARTS«: NEUE WEBSITE MIT INTERAKTIVEN ENERGIEDATEN

Das Fraunhofer ISE hat in diesem Jahr eine neue Transparenzwebsite mit interaktiven Energiedaten ins Leben gerufen. Auf www.energy-charts.de können Besucher ihre Grafiken selbst zusammenstellen: Leistung, Energie, Börsenstrompreise sowie Import und Export von Strom in europäische Nachbarländer können für unterschiedliche Zeiträume angezeigt werden. Zudem lassen sich einzelne Energieträger ein- und ausblenden oder mit einem dynamischen Lineal prozentuale bzw. Absolutwerte ablesen. Es werden dabei Datensätze vieler verschiedener Quellen ausgewertet und übersichtlich visualisiert. Ziel ist, Diskussionen zur Energiewende mit Fakten zu stützen und so zur Versachlichung der Thematik beizutragen.

Bruno Burger, **Johannes Mayer**, Alexander Schultz, Thomas Schlegl

Bereits 2011 hat das Team um Prof. Bruno Burger mit der wöchentlichen Erstellung von Foliensätzen zur Stromproduktion in Deutschland begonnen. Kern der Analysen waren zu Beginn stündlich aufgelöste Zeitreihen der Stromerzeugung nach Energieträger (Braun- und Steinkohle, Atomkraft, Gas, Wind, Wasser, Photovoltaik). Ein Novum ist dabei, dass die Zeitreihen vor der Darstellung mit statistisch ermittelten Korrekturfaktoren skaliert werden, denn nicht alle Kraftwerke sind zur Meldung ihrer stündlichen Erzeugungsdaten verpflichtet. Durch den Einsatz der Korrekturfaktoren wird eine sehr gute Abdeckung der Gesamterzeugung bei den einzelnen Energieträgern erreicht. Die Analysen wurden in den letzten Jahren kontinuierlich ausgebaut und um neue Themenbereiche erweitert, etwa den Import und Export von Strom, die relative Auslastung der Kraftwerke und die Entwicklung der Börsenstrompreise.

1 Projektwebsite: www.energy-charts.de.

Durch die Kombination dieser Datensätze sind die Wissenschaftler in der Lage zu untersuchen, wie sich die einzelnen Kraftwerkstypen im Gesamtsystem verhalten und welche Schritte zur besseren Integration von erneuerbaren Energien in das Gesamtsystem erforderlich sind.

Die Entwicklung der neuen Transparenzwebsite »energy-charts« (Abb. 1) stellt die Visualisierung der Energiedaten technisch auf eine neue Basis und erfährt bereits sehr positive Resonanz. Durch den interaktiven Ansatz können die Benutzer erstmals individuelle Grafiken erstellen und für eigene Analysen einsetzen. Künftig sind weitere Darstellungen und neue Auswertungen geplant.

www.energy-charts.de

SERVICEBEREICHE



In Ergänzung zu unserer Forschung und Entwicklung bieten wir Kunden Prüf- und Zertifizierungsverfahren an. Derzeit verfügt das Fraunhofer ISE über fünf akkreditierte Test- und Kalibriereinrichtungen:

- TestLab Solar Thermal Systems
- TestLab Solar Façades
- TestLab PV Modules
- CalLab PV Cells und
- CalLab PV Modules.

Unser TestLab Power Electronics befindet sich im Akkreditierungsprozess. Der steigende Anteil an erneuerbaren Energien erfordert effiziente leistungselektronische Schaltungen zwischen Stromerzeugung, Speicher und Verbrauch. Dabei spielen Zuverlässigkeit und Normerfüllung der Komponenten die zentrale Rolle für die Akzeptanz und den wirtschaftlichen Erfolg der erneuerbaren Energien im Strom-Mix. Vor diesem Hintergrund überführen wir die bisherigen Servicelabors für Wechselrichter und Leistungselektronik in ein akkreditiertes TestLab Power Electronics.

In unserem TestLab Power Electronics bieten wir die Charakterisierung von Erzeugungseinheiten nach nationalen und internationalen Grid Codes an. Des Weiteren kann der Wirkungsgrad leistungselektronischer Geräte hochpräzise bestimmt werden.

Weitere Servicebereiche erstrecken sich über die ganze Bandbreite der Fraunhofer ISE FuE-Themen, von der Qualitätssicherung von Photovoltaik-Kraftwerken über Systemintegration und Smart-Grid-Themen bis hin zu Speichertechnologien sowie Wärmetransformationsthemen und Brennstoffzellen:

- TestLab Power Electronics
- ServiceLab PV Power Plants
- ServiceLab Smart Energy
- ServiceLab Batteries
- ServiceLab Lighting and DC Appliances
- ServiceLab Heat Pumps and Chillers
- ServiceLab Heat Exchangers
- ServiceLab Phase Change Materials
- ServiceLab Thermochemical and Porous Materials
- ServiceLab Air Handling Units
- ServiceLab Fuel Cells

Diese Einrichtungen bieten mit ihrer jeweiligen Mess- und Prüfausstattung Dienstleistungen für die Industrie. Das Spektrum der vorhandenen Einrichtungen ist auf den Folgeseiten dargestellt.

Darüber hinaus haben die Servicelabs auch eine Forschungsfunktion. Die bei Charakterisierung, Prüfung oder Test gewonnenen Erkenntnisse können in neue Forschungsthemen eingebettet werden – 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.

ANSPRECHPARTNER

Callab PV Cells cells@callab.de	Silicium-, Dünnschicht-, Organische Solarzellen	Dr. Wilhelm Warta Telefon +49 761 4588-5192
	Silicium-, Dünnschicht-, Organische Solarzellen	Wendy Schneider Telefon +49 761 4588-5146
	Mehrfach- und Konzentratorzellen	Dr. Gerald Siefer Telefon +49 761 4588-5433
Callab PV Modules modules@callab.de	Charakterisierung PV-Module	Dipl.-Ing. (FH) Frank Neuberger Telefon +49 761 4588-5280
	Charakterisierung Konzentratormodule	Dr. Gerald Siefer Telefon +49 761 4588-5433
TestLab PV Modules tlpv@ise.fraunhofer.de	Gebrauchsdauerprüfungen	Dipl.-Phys. Dipl.-Ing. (Arch.) Claudio Ferrara Telefon +49 761 4588-5650
	Modulprüfungen	Dipl.-Ing. Daniel Philipp Telefon +49 761 4588-5414
TestLab Solar Thermal Systems testlab-sts@ise.fraunhofer.de		Dr. Korbinian Kramer Dipl.-Ing. (FH) Stefan Mehnert Telefon +49 761 4588-5354
TestLab Solar Façades testlab-solarfacades@ise.fraunhofer.de	g-Wert Prüfung, U-Wert Prüfung	Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Amann Telefon +49 761 4588-5142
	BIPV, Sonnenschutz	Dipl.-Phys. Tilmann Kuhn Telefon +49 761 4588-5297
	Solarthermische Fassaden	Dr.-Ing. Christoph Maurer Telefon +49 761 4588-5667
	Spektrometrie, Goniometrie, SRI und Farbmessung	Dr. Helen Rose Wilson Telefon +49 761 4588-5149
	Tageslichtmessräume	Dr.-Ing. Bruno Bueno Telefon +49 761 4588-5377

TestLab Power Electronics testlab-powerelectronics@ise.fraunhofer.de	Roland Singer M. Eng. Telefon +49 761 4588-5948
ServiceLab PV Power Plants service.pvpowerplants@ise.fraunhofer.de	Dipl.-Ing. (BA) Boris Farnung Telefon +49 761 4588-5471
ServiceLab Smart Energy smartenergylab@ise.fraunhofer.de	Dr. Bernhard Wille-Haußmann Telefon +49 761 4588-5443
ServiceLab Batteries service.batteries@ise.fraunhofer.de	Dipl.-Ing. Stephan Lux Telefon +49 761 4588-5419
ServiceLab Lighting and DC Appliances service.lighting@ise.fraunhofer.de	Dipl.-Ing. (FH) Norbert Pfanner Telefon +49 761 4588-5224
ServiceLab Heat Pumps and Chillers service.heatpumps@ise.fraunhofer.de	Dipl.-Ing. Ivan Malenkovic Telefon +49 761 4588-5533
ServiceLab Heat Exchangers service.heatexchangers@ise.fraunhofer.de	Dr.-Ing. Lena Schnabel Telefon +49 761 4588-5412
ServiceLab Phase Change Materials service.pcm@ise.fraunhofer.de	Dipl.-Ing. (FH) Thomas Haussmann Telefon +49 761 4588-5351
ServiceLab Thermochemical and Porous Materials service.thermolab@ise.fraunhofer.de	Dr. Stefan Henninger Telefon +49 761 4588-5104
ServiceLab Air Handling Units service.airhandling@ise.fraunhofer.de	Dr.-Ing. Alexander Morgenstern Telefon +49 761 4588-5107
ServiceLab Fuel Cells service.fuelcells@ise.fraunhofer.de	Dipl.-Ing. Ulf Groos Telefon +49 761 4588-5202



KALIBRIEREN VON SOLARZELLEN NACH INTERNATIONALEN STANDARDS

Das CallLab PV Cells am Fraunhofer ISE bietet die Messung / Kalibrierung von Solarzellen verschiedenster PV-Technologien an und arbeitet national und international mit Firmen und Instituten an der Entwicklung präziser Messungen für neue Technologien. Das CallLab PV Cells zählt zu den weltweit führenden PV-Kalibrierlabors. Das Kalibrierlabor ist Referenz für Forschung und Industrie, Solarzellenhersteller lassen ihre Referenzsolarzellen für die Produktion nach internationalen Standards bei uns kalibrieren.

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

Das CallLab PV Cells ist gemäß ISO/IEC 17025 als Kalibrierlabor für die Solarzellenkalibrierung bei der Deutschen Akkreditierungsstelle DAkkS akkreditiert. In Kooperation mit PV-Herstellern und mit Unterstützung des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) arbeiten wir an der kontinuierlichen Verbesserung der Messunsicherheiten und der Entwicklung neuer Messverfahren. Die Entwicklung der Solarzellenparameter zu höheren Temperaturen (gemessen mit deren Temperaturkoeffizienten) spielt eine wichtige Rolle für den Ertrag im praktischen Einsatz. Ein neues Verfahren, das es uns erlaubt, die Temperaturkoeffizienten mit bisher unerreichter Präzision zu bestimmen, wird von Solarzellenherstellern rege nachgefragt. Besonderheit dabei ist die Messung der temperaturabhängigen spektralen Empfindlichkeit. Diese und weitere Spezialmessungen setzen wir in einem Projekt zur Optimierung von Hocheffizienzsolarzellen für maximalen Jahresertrag auf Basis der hochpräzisen Analyse der temperatur- und intensitätsabhängigen Zelldaten ein. Die intensive Zusammenarbeit mit der Entwicklung und Analyse von Hocheffizienzsolarzellen ist dabei eine wichtige Voraussetzung.

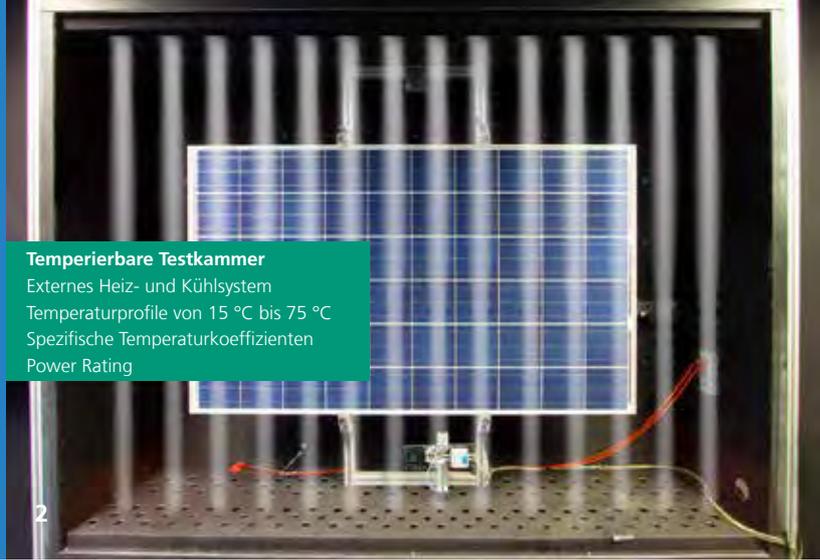
1 *Spektrale Empfindlichkeiten werden auch an großflächigen Solarzellen mit hoher Genauigkeit und mit exakter Angabe der Messunsicherheiten bestimmt.*

Um die Vergleichbarkeit von verschiedenen Solarzellentechnologien zu gewährleisten, arbeiten wir weiter an der Entwicklung von Messverfahren für neuartige Solarzellen. Wichtig sind hier vor allem einseitig kontaktierte sowie bifaciale Strukturen. Aber auch organische und Dünnschicht-Solarzellentechnologien, und hier wiederum die Mehrfachzellstrukturen, stellen eine besondere Herausforderung dar. Dabei können wir vorteilhaft unsere Erfahrungen mit der Kalibrierung von Mehrfachsolarzellen für Weltraum- und terrestrische Konzentratoranwendungen einbringen. Mit der Erweiterung unserer Kalibriermöglichkeiten von Mehrfachzellen aus Dünnschichtmaterialien konnten wir auch in diesem Jahr die Technologieentwicklung noch besser durch präzise Messungen unterstützen.

Die spektrale Empfindlichkeit bzw. externe Quanteneffizienz von Mehrfachsolarzellen wird an unserem Gittermonochromatormessplatz bestimmt, der speziell für die Vermessung von Mehrfachsolarzellen erweitert wurde.

Die Strom-Spannungskennlinie von Zweifach- und Dreifach-Solarzellen messen wir mit unserem Dreilichtquellensimulator unter nahezu beliebigen Normbedingungen, wie z. B. AM0 (ISO 15387) für Weltraum- und AM1.5d (ASTM G173-03) für Konzentratoranwendungen. Mit unserem Blitzlichtsimulator können Konzentratorsolarzellen bei bis zu 5000facher Sonneneinstrahlung vermessen werden.

Zusätzlich arbeiten wir unter anderem im Rahmen der Arbeitsgruppe WG7 des technischen Komitees TC82 der IEC an der Entwicklung von Kalibrierprotokollen für Solarzellen mit mehr als 3 pn-Übergängen.



Temperierbare Testkammer

Externes Heiz- und Kühlsystem
 Temperaturprofile von 15 °C bis 75 °C
 Spezifische Temperaturkoeffizienten
 Power Rating

WELTWEIT PRÄZISESTE CHARAKTERISIERUNG VON PV- UND CPV-MODULEN

Das CallLab PV Modules hat als Ergebnis umfassender Analysen und Optimierung die Messgenauigkeit seines Mess- und Prüflabors CallLab PV Modules auf 1,6 % gesenkt. Ein Rundvergleich mit den international führenden Laboren NREL (USA), AIST (Japan) und JRC (Italien) hat die hervorragende Reproduzierbarkeit unserer Messungen bestätigt. Damit baut das CallLab PV Modules seinen weltweiten Vorsprung bei der Präzision seiner Messungen für PV-Module weiter aus.

Daniela Dirnberger, Ulli Kräling, Klaus Kiefer, **Frank Neuberger**, Michael Schachtner, **Gerald Siefer**, Harry Wirth

Eine geringere Messunsicherheit steigert das Vertrauen in Messergebnisse und erhöht deren Aussagekraft. Davon profitieren Modulhersteller sowie Projektentwickler, Banken und Investoren gleichermaßen. So wirkt sich z. B. die geringere Messunsicherheit eines Referenzmoduls positiv auf die Messgenauigkeit eines Modulherstellers aus und stärkt so das Vertrauen in Typenschild- und Datenblattangaben.

Für unsere internationalen Kunden, die Modulmessungen zur Qualitätssicherung von PV-Kraftwerken einsetzen, hat die verbesserte Messgenauigkeit ebenfalls Vorteile. Banken und Investoren profitieren von präzisen Messungen, weil sie die Chancen auf eine sichere Rendite erhöhen. Die Messunsicherheit des Prüflabors fließt in Projekten häufig als Pass- / Fail-Kriterium für die Modulleistung ein und ist damit die entscheidende Größe für die Bewertung der eingesetzten Module.

Darüber hinaus profitieren Kunden von höchster Messpräzision, die Zertifizierungsprüfungen, Langzeit- und Degradationsanalysen bei uns durchführen lassen. Das Risiko einer ungerechtfertigten Ablehnung eines geprüften Modultyps

1 *Präzise Vermessung des Simulatorspektrums als Basis für die weltweit kleinste Messunsicherheit.*

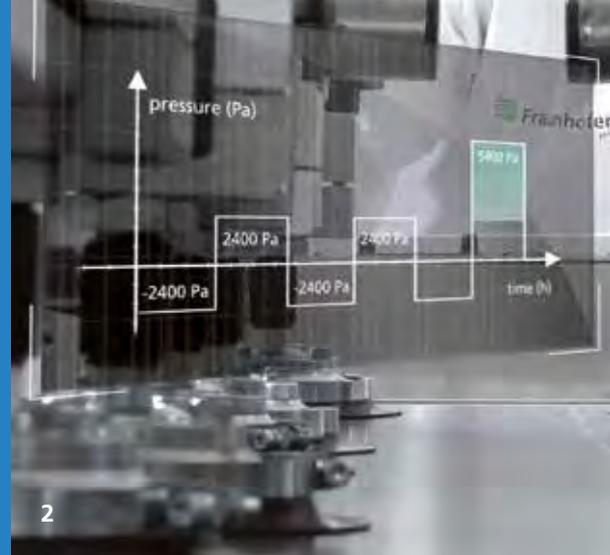
2 *Im Sonnensimulator integrierte Temperierkammer zur präzisen Charakterisierung von PV-Modulen für das Power Rating gemäß IEC 61853-1.*

im Rahmen einer Zertifizierungsprüfung sinkt. In entwicklungsbegleitenden Prüfungen können Degradationseffekte frühzeitiger erkannt werden.

Zusätzlich zur präzisen Leistungsbestimmung sind weitere Eigenschaften der PV-Module als wichtige Einflussfaktoren auf den Ertrag einer PV-Anlage zu ermitteln. Dazu zählen besonders die Anfangsdegradation (LID) sowie das Schwachlicht- und Temperaturverhalten der Module. Auf Basis dieser Power-Rating-Messungen sind präzise Vorhersagen für den Energieertrag von PV-Kraftwerken für jeden Standort möglich. Das CallLab PV Modules unterstützt Modulhersteller, EPCs und Investoren bei der Qualitätssicherung ihrer Produkte weltweit.

Vermessung von Konzentratormodulen

Zur Charakterisierung von Konzentratormodulen unter Freilandbedingungen betreiben wir mehrere Nachführeinheiten mit Messdatenerfassung. Zusätzlich steht uns ein Labormessplatz für Konzentratormodule zur Verfügung. Dies erlaubt uns die Bestimmung des Wirkungsgrades von Konzentratormodulen unter Standardbedingungen. Die Methoden hierzu sind bisher jedoch noch nicht in einer internationalen Norm festgehalten. Daher arbeiten wir aktiv in der Arbeitsgruppe WG7 des technischen Komitees TC82 der IEC an der Weiterentwicklung von internationalen Standards im Bereich der Konzentratorphotovoltaik mit.



UMFASSENDE MODULPRÜFUNGEN IM TESTLAB PV MODULES

Das TestLab PV Modules bietet ein breites Spektrum an Dienstleistungen für Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprüfungen an. In unserem nach ISO 17025 akkreditierten Labor betreiben wir modernste und innovative Prüfanlagen. Durch unsere langjährige wissenschaftliche Erfahrung im Bereich der Gebrauchsdauermanalyse sind wir für unsere Kunden ein kompetenter und unabhängiger Ansprechpartner.

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

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

Beratung und Durchführung von kunden- und anwendungsspezifischen Prüfungen

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

1 In der kombinierten UV- und Feuchte-Wärme-Klimakammer können PV-Module bei einer maximalen UV-Dosis von 200 W/m², einer maximalen Feuchte von 60 % r. F. und einer maximalen Temperatur von 90 °C gealtert werden. Über die Standardanforderungen hinaus kann somit das gleichzeitige Einwirken mehrerer Degradationsfaktoren simuliert werden.

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

Beurteilung und Analyse von Fehlerbildern, Risikominimierung

Potential Induced Degradation (PID), sogenannte Schnecken Spuren und Isolationsprobleme sind nur einige typische Fehlerbilder, mit denen Kunden häufig an uns herantreten. Wir bieten die Möglichkeit, diese und andere Fehlerbilder systematisch zu analysieren sowie Ursachen und Auswirkungen zu identifizieren. Unser Ziel ist, 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 IM TESTLAB SOLAR THERMAL SYSTEMS

Das TestLab Solar Thermal Systems ist eine weltweit durch nationale Zertifizierer anerkannte Prüfstelle und durch die Deutsche Akkreditierungsstelle (DAkkS) voll akkreditiert (ISO 17025). Wir prüfen Sonnenkollektoren, Wärmespeicher sowie Komplettsysteme und unterstützen damit unsere Kunden bei der Entwicklung von solarthermischen Energiesystemen.

Sven Fahr, Konstantin Geimer, **Korbinian Kramer**, Stefan Mehnert, Arim Schäfer, Christian Schmidt, Christoph Thoma, Werner Platzer

Seit 2012 steht unser großer Teststand für mechanische Lasten zur Verfügung. Es konnten bereits unterschiedlichste Fragestellungen bezüglich der Widerstandsfähigkeit von Montagesystemen, PV-Modulen und Solarthermiekollektoren damit bearbeitet werden. Der hochvariable Teststand ist in eine Klimakammer eingebracht, was das Testen von unterschiedlichsten Lastfällen bei gleichzeitig eingestellter Umgebungstemperatur (-40 °C bis 90 °C) ermöglicht. Das Angebot ist hier auch abgestimmt mit den Anforderungen des DIBt. Zu den Besonderheiten gehören die große Prüffläche mit 3 m x 5 m sowie die Abbildung von verschiedenen Lastfällen, z. B. wechselnde Belastung, gradierte Lasten, Schublasten. Entscheidend ist, dass wir bereits heute die Anforderungen an eine notifizierte Stelle für die Fragen der Bauproduktverordnung erfüllen.

Weitergeführt wurden vergleichende Untersuchungen zu PVT-Kollektoren. Gemeinsam mit dem TestLab PV Modules kann damit eine komplette Zertifizierung von PVT-Kollektoren angeboten werden.

Unser bereits etablierter Solarluftkollektorteststand wurde intensiv genutzt. Eine technische Charakterisierung, ähnlich wie

1 *Testfläche des Fraunhofer ISE TestLab Solar Thermal Systems Freiluftlabors in Freiburg.*

2 *Belastungsprüfstand.*

für flüssigkeitsführende Kollektoren, und eine Solar Keymark Zertifizierung sind damit ab diesem Jahr möglich.

Systemuntersuchungen, insbesondere auch Speichervermessung können in unserem System- und Speicherlabor durchgeführt werden. Hier werden auch die notwendigen Kennzahlen zur Bewertung von Speichern nach dem Energy Label (ErP) der EU ermittelt.

Unser Solarsimulator liefert weiterhin die gewohnt hohe Wiederholgenauigkeit.

In Kombination mit unserem Präzisions-Tracker konnten wir unseren Mitteltemperatur-Teststand einsetzen, um Wirkungsgradkennlinien mit Arbeitspunkten bis zu 200 °C zu bestimmen. 2014 ist es uns gelungen, erfolgreich eine in situ Charakterisierung eines großen, konzentrierenden Kollektors durchzuführen. Damit betritt das TestLab Solar Thermal Systems Neuland im Kontext der verbreiteten Kollektorzertifizierung.

2014 trat eine der wichtigsten Grundlagennormen in ihrer neuen Version in Kraft (EN ISO 9806). Das TestLab Solar Thermal Systems konnte direkt alle neu in den Anwendungsbereich aufgenommenen Technologien sowie die Änderungen in den Testmethoden innerhalb seines Akkreditierungsumfangs anbieten. Das ist weltweit einzigartig.

www.kollektortest.de



VERMESSUNG VON FASSADEN UND TRANSPARENTEN BAUTEILEN

Entwicklern, Herstellern und Planern von Fassaden, -komponenten und solaren Komponenten bieten wir im TestLab Solar Façades ein umfassendes Dienstleistungsangebot zur Charakterisierung von innovativen Bauteilen oder Materialien an. Für transparente Bauteile und Sonnenschutzsysteme stehen Speziallabors zur Bestimmung der optischen und thermischen Eigenschaften zur Verfügung. Bei Fassaden zur aktiven Solarenergienutzung (mit PV und / oder Solarthermie) bieten wir eine umfassende Charakterisierung an, die auch die Wechselwirkung zwischen Ertrag, Komfort und passiven Solargewinnen berücksichtigt. Außerdem verfügen wir über einen Tageslicht-Container und einen Außenprüfstand.

Ulrich Amann, Bruno Bueno, Johannes Hanek, Angelika Helde, **Tilmann Kuhn**, Christoph Maurer, Helen Rose Wilson, Hans-Martin Henning

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

Folgende Prüfstände stehen zur Verfügung:

- Solarkalorimeter zur Bestimmung des Gesamtenergie-durchlassgrads (g-Wert), auch für aktive Solarfassaden
- Photogoniometer zur bi-direktionalen Charakterisierung (BSDF) des Streuverhaltens von transparenten, transluzenten und lichtlenkenden Bauteilen
- 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.



VERMESSUNG VON LEISTUNGSELEKTRONIK NACH INTERNATIONALEN STANDARDS

Im Zuge der Energiewende erleben wir eine weitreichende Transformation der Energiesysteme. Im Zentrum dieser Entwicklung stehen leistungselektronische Schaltungen als Bindeglied zwischen Erzeugern, Speichern und Verbrauchern. Für deren Akzeptanz und wirtschaftlichen Erfolg sind eine hohe Effizienz und Zuverlässigkeit sowie die Einhaltung aller relevanten Normen und Netzeinspeiserichtlinien von höchster Bedeutung. Im TestLab Power Electronics bieten wir die Charakterisierung von Erzeugungseinheiten nach nationalen und internationalen Grid Codes an. Des Weiteren kann der Wirkungsgrad leistungselektronischer Geräte hochpräzise bestimmt werden.

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

Megawattlabor

Im Megawattlabor können leistungselektronische Geräte bis zu einer Leistung von 1 MW betrieben werden. Hierfür steht ein PV-Generatorsimulator mit einer Leistung von 1,4 MW zur Verfügung. Für Vermessungen wird ein hochpräzises und hochdynamisches Messsystem verwendet, das Ströme bis 5000 A erfassen kann. Für den Betrieb netzgekoppelter Umrichter verfügt das Labor über einen Anschluss an das 20-kV-Mittelspannungsnetz sowie mehrere Einspeisetransformatoren mit einer Leistung von je 1,25 MVA. Die Spannung der Transformatoren kann von 255 bis 790 V variiert werden. Zur Untersuchung der dynamischen Netzstützung von Umrichtern ist das Labor mit einer Prüfeinrichtung für »Low Voltage Ride Through« (LVRT) sowie »High Voltage Ride Through« (HVRT) ausgestattet.

Vermessungen im Feld

Für die Vermessungen im Feld verfügen wir über ein Mess-

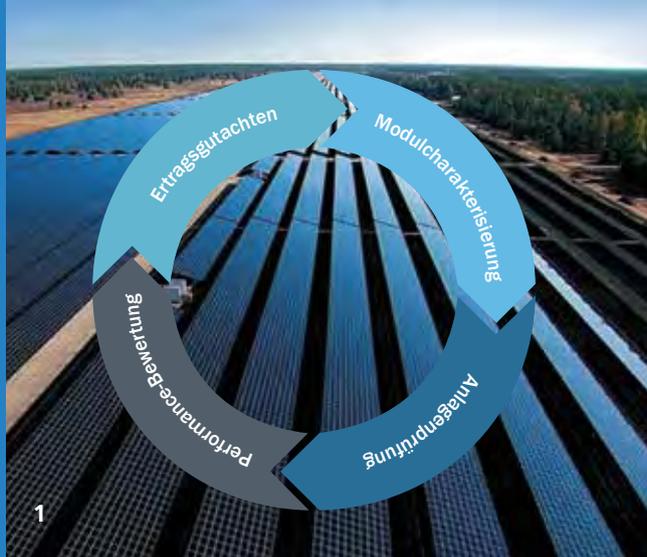
1 Das Megawattlabor ermöglicht die hochpräzise Charakterisierung von netzgekoppelten Umrichtern hinsichtlich ihres Verhaltens am Netz.

2 Mobiler LVRT-Test-Container zur Untersuchung des Verhaltens großer Erzeugungsanlagen während kurzzeitiger Netzfehler (LVRT). Es können Anlagen bis zu einer maximalen Scheinleistung von 4,5 MVA direkt vor Ort geprüft werden.

system mit bis zu 96 synchronen Messkanälen, das verteilt im Feld, z. B. in einem PV-Park, verwendet werden kann. Zum Testen von PV-Wechselrichtern in realer Umgebung stehen in unserem Testfeld in Dürbheim ein flexibel konfigurierbarer PV-Generator mit einer Nennleistung von 1 MWp sowie ein Anschluss an das 20-kV-Mittelspannungsnetz zur Verfügung. Des Weiteren ist ein 1,25-MVA-Transformator mit flexibel einstellbarer Spannung von 265 bis 1120 V vorhanden.

Service-Leistungen des TestLab Power Electronics

In unserem Prüflabor arbeiten wir streng nach ISO 17025 und bieten die Vermessung von Erzeugungsbauteilen wie PV-Wechselrichter oder Blockheizkraftwerke nach nationalen (TR3) sowie internationalen Einspeiserichtlinien, etwa für Italien, China und Spanien, an. Wir unterstützen unsere Kunden bei der Modellierung von Erzeugungseinheiten nach TR4 und bei der Validierung dieser Modelle. Des Weiteren können hochgenaue Messungen des Wirkungsgrads leistungselektronischer Geräte sowie des Gesamtwirkungsgrads von PV-Wechselrichtern nach EN 50530 durchgeführt werden. Sowohl in unserem Labor als auch im Feldeinsatz führen wir kundenspezifische Vermessungen durch und beraten unsere Kunden auch gerne im Vorfeld der Messkampagnen. Auch im Bereich der Modellierung und Simulation von einzelnen Bauteilen bis zum kompletten PV-Park bieten wir unsere Unterstützung an. Im Nachgang der Messungen werten wir die Ergebnisse nach bestimmten Anforderungen aus und bieten kompetente Beratungen zu Verbesserungsmöglichkeiten an.



ServiceLab PV Power Plants

Das Fraunhofer ISE leistet seit 1990 mit seinen Dienstleistungen einen wichtigen Beitrag zur Qualitätssicherung von Photovoltaik (PV)-Kraftwerken. Mit den vier Schritten unseres Qualitätszirkels bieten wir eine durchgehende Qualitätsbewertung von der Planung bis zum laufenden Betrieb von PV-Kraftwerken an:

Unsere Ertragsgutachten liefern Investoren und Banken die Grundlagen für eine wirtschaftliche Bewertung des geplanten PV-Kraftwerks und genaue Aussagen über den zu erwartenden Ertrag am Standort. Bei der Simulation der Komponenten stützen wir uns auf unser Expertenwissen aus dem Feld und unsere Erfahrungen aus der Charakterisierung der Komponenten aus den Labors. Die weltweit einmalige Messunsicherheit von 1,6 % des CaLab PV Modules ermöglicht die Leistungsermittlung für PV-Module mit höchster Präzision.

Damit unsere Kunden sicher sein können, dass ihr Kraftwerk auch wirklich dem Stand der Technik entspricht und die versprochene Leistung bringt, bieten wir eine umfangreiche Vollprüfung des gesamten Kraftwerks an. Eine Vor-Ort-Analyse mit visueller Überprüfung, thermographischen Aufnahmen und tatsächlicher Leistungsermittlung gibt Aufschluss über die Qualität der Anlage und dokumentiert auffällige Mängel.

Hat eine PV-Anlage den Betrieb aufgenommen, ermitteln wir die tatsächliche Performance Ratio des Kraftwerks und vergleichen die Ergebnisse mit den Werten des Ertragsgutachtens. Durch die frühzeitige Erkennung eines nicht optimalen Betriebs ermöglichen wir den Kraftwerksbetreibern, rechtzeitig notwendige Korrekturmaßnahmen zu treffen.

Boris Farnung, Klaus Kiefer, Frank Neuberger, Harry Wirth

1 In Templin, Deutschlands größtem PV-Kraftwerk, haben wir eine durchgehende Qualitätssicherung durchgeführt.

ServiceLab Batteries

Batterietechnologien

Wir prüfen auf einer Fläche von über 400 m² Batterien und Systeme auf der Basis von z. B. Blei, NiMH, Li-Ionen-Zellen sowie Hochtemperaturbatterien und Doppelschichtkondensatoren. Die Laborausstattung beinhaltet Batterietestsysteme und Impedanzspektrometer, mit denen nach Norm oder nach Kundenanforderung in der Klimakammer oder im Wasserbad getestet wird.

Langzeittests

Für Alterungsuntersuchungen und Lebensdaueranalysen von Batterien und -systemen bieten wir mehrmonatige Langzeittests an.

Automotive-Bereich

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

Stationäre Solarspeicher

Aktuell kommen eine Vielzahl von Heimspeichern für den Privatanwender auf den Markt. Wir testen mit Solarsimulatoren und unserer Ausstattung an Wechselrichtern und Laderegeln elektrische Speichersysteme in einer realitätsnahen Umgebung, sowohl in der netzgekoppelten als auch in der netzunabhängigen Anwendung.

Georg Bopp, Nikolaus Lang, **Stephan Lux**, Stefan Rinne, Matthias Vetter, Günther Ebert

2 Innenansicht ServiceLab Batteries am Fraunhofer ISE.



ServiceLab Lighting and DC Appliances

Charakterisierung

Wir führen präzise Messungen lichttechnischer Größen an LED und Leuchtstofflampen, Leuchten und Beleuchtungssystemen durch, z. B. Messung des Lichtstroms, der Lichtausbeute und der Beleuchtungsstärkeverteilung, sowie das lichttechnische Betriebs- und Langzeitverhalten unter verschiedenen Umgebungsbedingungen. Für LED-Leuchtmittel und LED-bestückte Leuchten ermitteln wir die L70 bzw. L50 Lebensdauer bei verschiedenen Betriebsbedingungen und messen die erreichbare Beleuchtungsdauer (Autonomiezeit) bei batterieversorgten Leuchten. Wir erfassen ebenfalls die elektrischen Eigenschaften von Betriebselektronik und Vorschaltgeräten wie den Wirkungsgrad, das Betriebsführungsverhalten und das Fehler- und Überlastverhalten.

Apparative Ausstattung

- softwaregesteuerter Lichtmessstand mit einem Kugelphotometer mit 1,50 m Durchmesser
- softwaregesteuertes Spektrometer zur automatisierten Messung der spektralen Lichtverteilung mit einem Kugelphotometer mit 1,0 m Durchmesser
- Leuchtdichtekamera, Luxmeter und Langzeitteststände
- breitbandige, präzise Wattmeter, Digitaloszilloskope
- programmierbare, langzeitstabile Stromversorgungen
- Goniophotometer zur Bestimmung von Lichtstärkeverteilungskurven (LVK)

Georg Bopp, **Norbert Pfanner**, Günther Ebert

ServiceLab Smart Energy

Die zunehmend wirtschaftlich attraktiven dezentralen Erzeuger, E-Fahrzeuge, Wärmepumpen und elektrische Speicher erobern unsere Wohngebäude. Veränderungen in der Förderstruktur führen zu neuen Betriebsstrategien, von der reinen Volleinspeisung hin zur Eigenversorgung mit lokalen netzdienlichen Regelungskonzepten.

Das ServiceLab Smart Energy verfügt über eine vollständige Ausstattung von dezentralen Erzeugungstechnologien und Speichern zukünftiger Wohngebäude. Über leistungsfähige Simulationsrechner wird der modellbasierte »Hardware-in-the-Loop«-Betrieb zur Bewertung von Systemreglern ermöglicht. So können für die Bewertung von innovativen Systemkomponenten wie PV-Batteriesystemen und Wärmepumpen beliebige dynamische Szenarien für Last und Erzeugung im häuslichen Kontext aufgeprägt werden.

Die Infrastruktur des ServiceLab Smart Energy ermöglicht Systemanbietern sowohl ihre Einzelsysteme als auch Gesamtkonzepte in einer realitätsnahen Umgebung zu testen, zu evaluieren und damit Geschäftsmodelle und Regler zu prüfen. Diese Analysen beinhalten z. B. Effizienzbewertungen sowie die Bewertung und Entwicklung von Energiemanagement-Gateways oder lokalen Regelungskonzepten.

Bernhard Wille-Haußmann, Christof Wittwer, Günther Ebert

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

2 Innenansicht des ServiceLab Smart Energy.



ServiceLab Heat Pumps and Chillers

Durch die Fertigstellung des neuen Technikums für Wärmepumpen und Kältemaschinen können wir eine breite Palette an standardisierten oder maßgeschneiderten Prüfungen für verschiedene Technologien (elektrisch, thermisch oder Gas angetrieben) und Leistungsklassen (bis 100 kW Kälte- oder Heizleistung) anbieten. Dazu steht uns modernste Konditionier- und Messtechnik zu Verfügung. Das ServiceLab ist für den Umgang mit natürlichen Kältemitteln (Kohlenwasserstoffe, Ammoniak, CO₂) ausgestattet.

Neben einer kalorimetrischen Doppelklimakammer, in der Prüflinge bei Temperaturen von -25 bis 50 °C und Luftfeuchte von 25 bis 95 % vermessen werden können, verfügt das Technikum über mehrere Konditioniereinheiten für Wasser, Sole und Luft, die in einem breiten Temperatur- und Luftfeuchtigkeitsbereich die genauesten Messungen sowohl unter stationären als auch unter dynamischen Betriebsbedingungen (inkl. Hardware-In-The-Loop) erlauben. Darüber hinaus werden auch komponentenspezifische Teststände betrieben, z. B. Verdampfer- oder Fluidverteiler-Teststand, bei denen die fortschrittlichste Messtechnik zum Einsatz kommt, wie PIV (particle image velocimetry) und Shadowgraphie.

Constanze Bongs, Simon Braungardt, **Ivan Malenkovic**, Marek Miara, Thore Oltersdorf, Peter Schossig, Christian Sonner, York Tiedtke, Jeannette Wapler, Hans-Martin Henning

1 Teil eines Teststands zur Vermessung von Komponenten für brennbare Kältemittel.

ServiceLab Phase Change Materials

Im ServiceLab Phase Change Materials werden Latentwärmespeicher-Materialien, -Verbünde, -Objekte und Systeme gemäß den Prüfkriterien nach RAL GZ 896 vermessen. Das Labor ist zugelassene Zertifizierungsstelle für dieses Gütezeichen.

Außerdem stehen Messgeräte für folgende Materialparameter zur Verfügung:

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

Stefan Gschwander, **Thomas Haussmann**, Peter Schossig, Hans-Martin Henning

2 Calvet DSC zur thermischen Charakterisierung der PCM.



ServiceLab Thermochemical and Porous Materials

Das ServiceLab Thermochemical and Porous Materials bietet ein breites Spektrum an Analysemöglichkeiten rund um die Materialentwicklung und Fragestellungen bezüglich Oberfläche, Porenstruktur und Porosität, Adsorptionscharakteristik von verschiedenen Gasen sowie der Morphologie von porösen Materialien und Werkstoffen an.

Wir haben die Möglichkeit, isotherme Gassorptionsmessungen mit verschiedenen Prüfgasen (N_2 , CO_2 , EtOH, MeOH, H_2O) zur Bestimmung der spezifischen Oberfläche, des Porenvolumens, der Porengrößenverteilung sowie die gesamte Adsorptionscharakteristik mit volumetrischen Methoden durchzuführen.

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

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

Max Baumgartner, **Stefan Henninger**, Philipp Hügenell, Harry Kummer, Gunther Munz, Peter Schossig, Hans-Martin Henning

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



ServiceLab Fuel Cells

Membran-Brennstoffzellen und -Systeme charakterisieren und prüfen wir normgerecht bis zu elektrischen Leistungen von 20 kW_{el}.

Unsere begehbare Klimakammer ermöglicht Untersuchungen von Brennstoffzellen-Stacks und -Systemen bei Temperaturen von -40 °C bis +80 °C und relativen Feuchten zwischen 10 und 95 %. Hervorzuheben ist der hohe Durchsatz klimatisierter Luft bis zu 2000 m³ pro Stunde. Für systemnahe Untersuchungen können wir Peripherieaggregate wie Pumpen, Lüfter, Ventile ansteuern. Inhomogenitäten im Stack identifizieren wir über simultanes Einzelzellmonitoring hinsichtlich Zellspannung und Zellimpedanzspektrum.

Darüber hinaus bieten wir Langzeittests von Peripherieaggregaten mit Wasserstoffbeaufschlagung und bei extremen Klimata an. Außerdem steht uns eine Unterdruckkammer für die Simulation von Höhen bis 6000 m zur Verfügung. Zellkomponenten untersuchen wir hinsichtlich ihrer elektrochemischen Beständigkeit mit einem 3-Elektroden-Aufbau oder Auslagerungsversuchen.

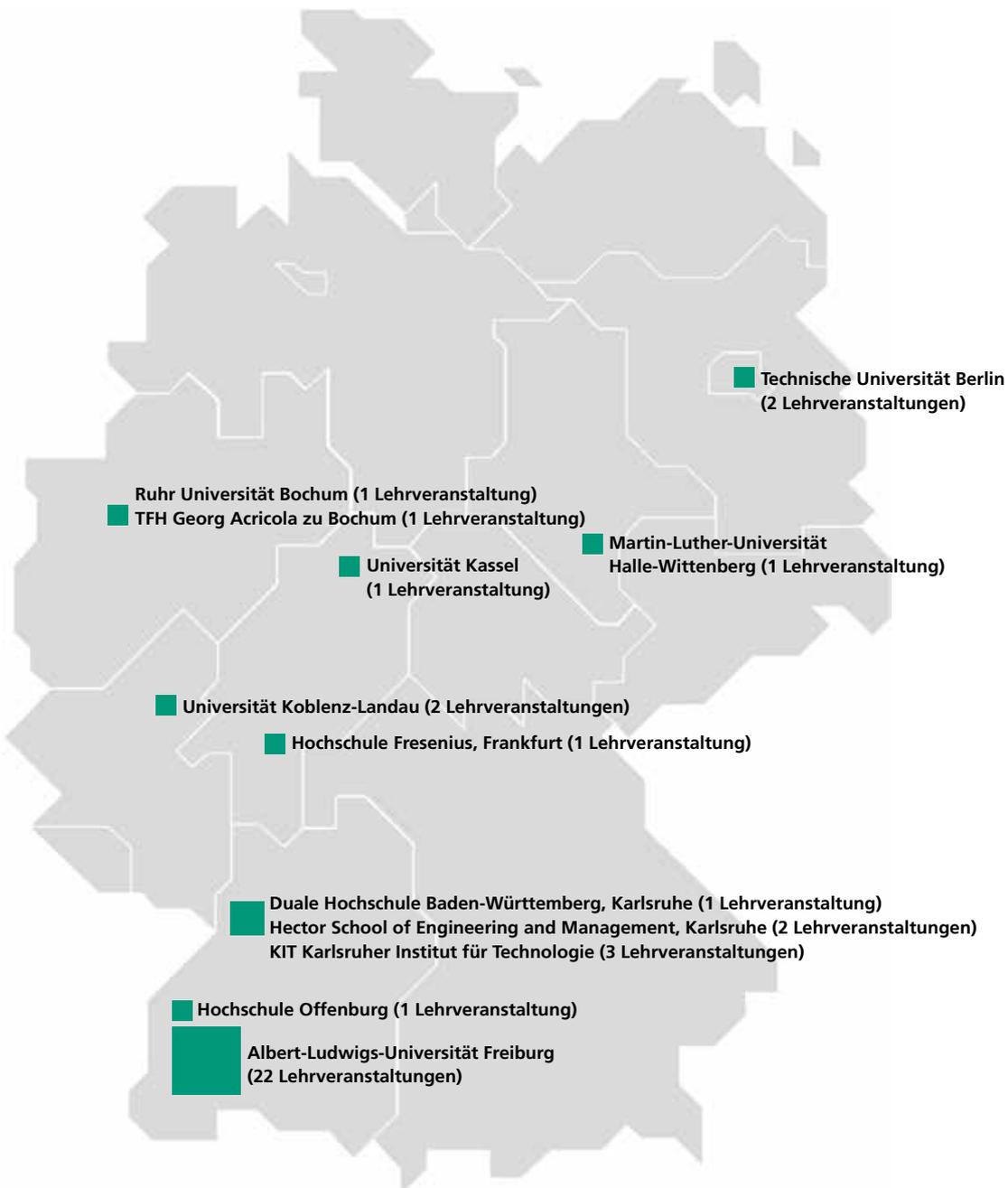
Ulf Groos, Thomas Jungmann, Christopher Hebling

2 *Langzeittest von Ventilen in der Klimaprüfzelle.*

ANHANG

LEHRVERANSTALTUNGEN

Das Fraunhofer ISE ist eng mit Universitäten, Fachhochulen und anderen Forschungseinrichtungen vernetzt. Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen des Fraunhofer ISE sind in verschiedenen Städten im akademischen Lehrbetrieb engagiert. Dadurch wird nicht nur Wissen und praktische Erfahrung an Studierende weiter gegeben. Die engen Verbindungen zur Lehre steigern auch die hohe Themenkompetenz des Instituts.



Eine genaue Übersicht über alle Lehrveranstaltungen, die Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen des Fraunhofer ISE anbieten, findet sich im Internet: www.ise.fraunhofer.de/vorlesungen-seminare

PROFESSUREN UND PROMOTIONEN

Professuren

Prof. Dr. Hans-Martin Henning
Professur »Technische Energiesysteme«
Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Januar 2014

Prof. Dr.-Ing. Christof Wittwer
Ernennung zum Honorar Professor der Albert-Ludwigs-Universität
Freiburg
Lehrfähigkeit an der Fakultät für Umwelt und natürliche Ressourcen,
Masterstudiengang REM, Renewable Energy Management
Juli 2014

Promotionen

Helene Ahme
»Spectroscopic Investigations of Transfer and Transport of Charge
Carriers in the Donor / Acceptor Network of Organic Solar Cells«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Robert Alink
»Wasserhaushalt in PEM-Brennstoffzellen«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Stefanie Essig
»Entwicklung höchsteffizienter GaInP/GaAs/Si-Mehrfachsolarzellen
mittels Wafer-Bonding«
Universität Konstanz
Konstanz, 2014

Tobias Fellmeth
»Silicium Solarzellen zur Anwendung in niederkonzentrierenden
Systemen – Entwicklung und Charakterisierung«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Stefan Fischer
»Upconversion of Sub-Band-Gap Photons for Silicon Solar Cells«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Johannes Gutmann
»Photonic Luminescent Solar Concentrators«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Barbara Herter
»Photonic Structures for Systems with Silicon Solar Cells and
Upconverters«
Universität Konstanz
Konstanz, 2014

Rene Hönig
»Entwicklung und Mikrostrukturcharakterisierung von Dickschicht-
kontakten für hocheffiziente Industriesolarzellen«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Sabrina Jüchter
»Theoretische und experimentelle Analyse von metallischen Nano-
strukturen als Photonenmanagementstrukturen für den Einsatz in
Solarzellen«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Martin Keller
»Weiterentwicklung einer Durchlauf-Epitaxieanlage und Implemen-
tierung einer turbulenten Gasführung«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Sven Kluska
»Development and Characterization of Laser Chemical Processes for
High Efficiency Silicon Solar Cells«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Korbinian Kramer
»Einfluss von Normungs- und Qualitätssicherungsprozessen auf
Innovation und Diffusion in der Solarthermiebranche«
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Georg Krugel

»Entwicklung und Charakterisierung von gesputterten Schichten zur Passivierung hocheffizienter Siliciumsolarzellen«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Marek Miara

»Analytische Methode zur Beurteilung von Wärmepumpen unter Berücksichtigung ökologischer, energetischer und ökonomischer Aspekte«

Technische Universität Breslau
Breslau (Wroclaw), 2014

Bernhard Michl

»Material Limits of Multicrystalline Silicon in Advanced Solar Cell Processing«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Anton Neuhäuser

»Untersuchung von Kreisprozessen für die solarthermische Stromerzeugung im kleinen und mittleren Leistungsbereich«

Technische Universität München
München, 2014

Cornelia Peike

»Degradation Analysis of the Encapsulation Polymer in Photovoltaic Modules by Raman Spectroscopy«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Thomas Rachow

»Deposition and Characterisation of Crystalline Silicon«

Universität Konstanz
Konstanz, 2014

Sebastian Rau

»Hocheffiziente Erzeugung solaren Wasserstoffs durch direkte Verschaltung von III-V-Mehrfachsolarzellen mit PEM-Elektrolysezellen«

Universität Stuttgart
Stuttgart, 2014

Michael Rauer

»Alloying from Screen-printed Aluminum Pastes for Silicon Solar Cell Applications«

Universität Konstanz
Konstanz, 2014

Armin Richter

»Aluminum Oxide for the Surface Passivation of High Efficiency Silicon Solar Cells – Technology and Advanced Characterization«

Universität Konstanz
Konstanz, 2014

Philip Rothhardt

»Co-diffusion for Bifacial n-type Solar Cells«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Sebastian Schiefer

»Durchkontaktierte organische Solarzellen«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Kai Schillinger

»Crystalline Silicon Carbide Intermediate Layers for Silicon Thin-Film Solar Cells«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Christoph Schwab

»Herstellung und Charakterisierung industrieller oberflächenpassivierter Solarzellen«

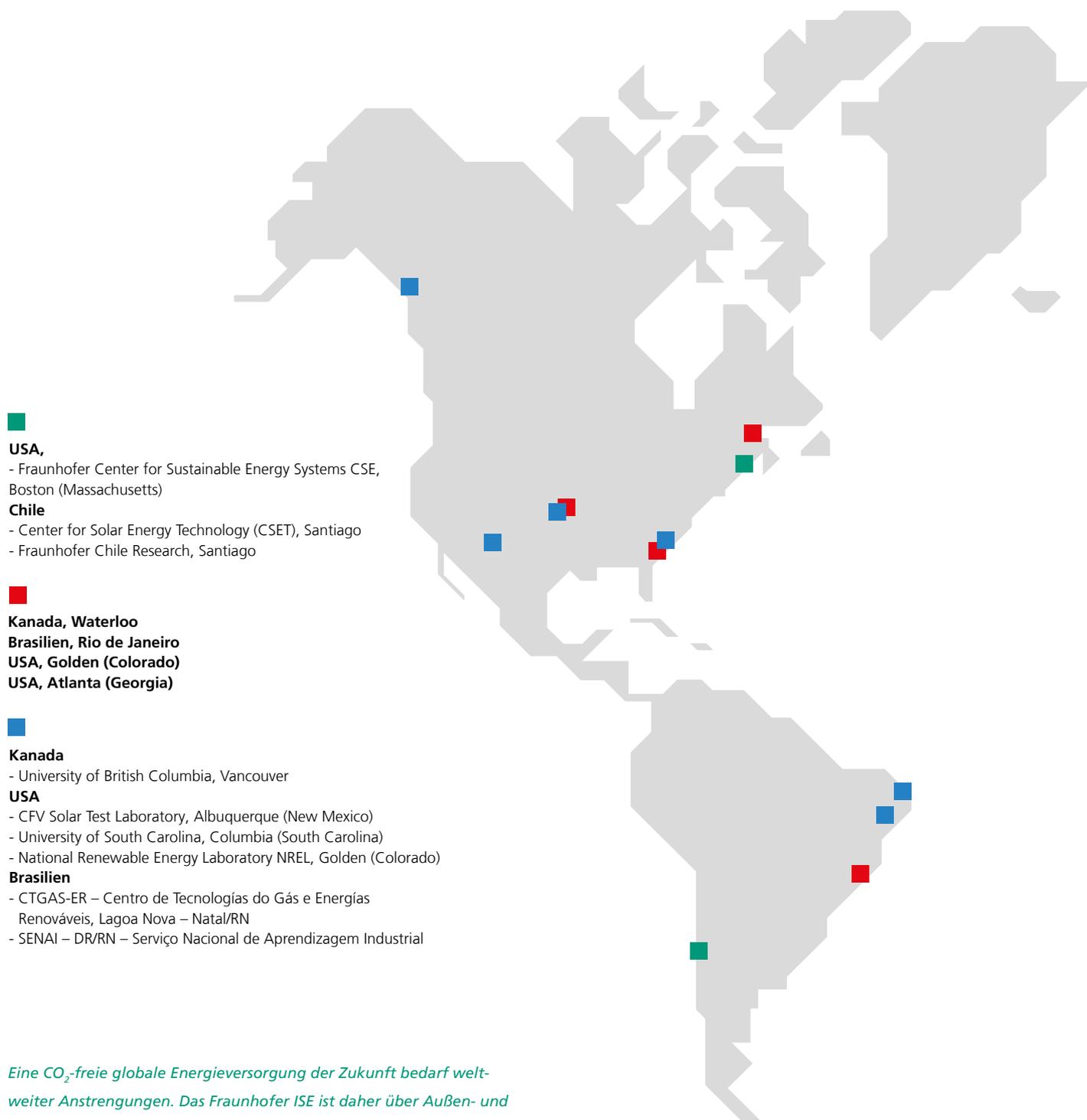
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Freiburg, 2014

Karl-Anders Weiß

»Charakterisierung und Bewitterungsprüfung von Polymermaterialien für Anwendungen in der Solartechnik«

Universität Ulm
Ulm, 2014

INTERNATIONALE VERNETZUNG



- **USA,**
- Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE, Boston (Massachusetts)
- Chile**
- Center for Solar Energy Technology (CSET), Santiago
- Fraunhofer Chile Research, Santiago

- **Kanada, Waterloo**
- Brasilien, Rio de Janeiro**
- USA, Golden (Colorado)**
- USA, Atlanta (Georgia)**

- **Kanada**
- University of British Columbia, Vancouver
- USA**
- CFV Solar Test Laboratory, Albuquerque (New Mexico)
- University of South Carolina, Columbia (South Carolina)
- National Renewable Energy Laboratory NREL, Golden (Colorado)
- Brasilien**
- CTGAS-ER – Centro de Tecnologias do Gás e Energias Renováveis, Lagoa Nova – Natal/RN
- SENAI – DR/RN – Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial

Eine CO₂-freie globale Energieversorgung der Zukunft bedarf weltweiter Anstrengungen. Das Fraunhofer ISE ist daher über Außen- und Auslandsgeschäftsstellen (■), Memorandums of Understanding mit Forschungsinstitutionen weltweit (■) sowie nicht zuletzt durch die zahlreichen internationalen Gastwissenschaftler von Hochschulstandorten weltweit (■), die am Fraunhofer ISE forschen und ihre Expertise einbringen, global vernetzt. Das Fraunhofer ISE ist zudem in zahlreichen internationalen Gremien, Verbänden und Vereinigungen aktiv: www.ise.fraunhofer.de/de/ueber-uns/gremien

**Deutschland**

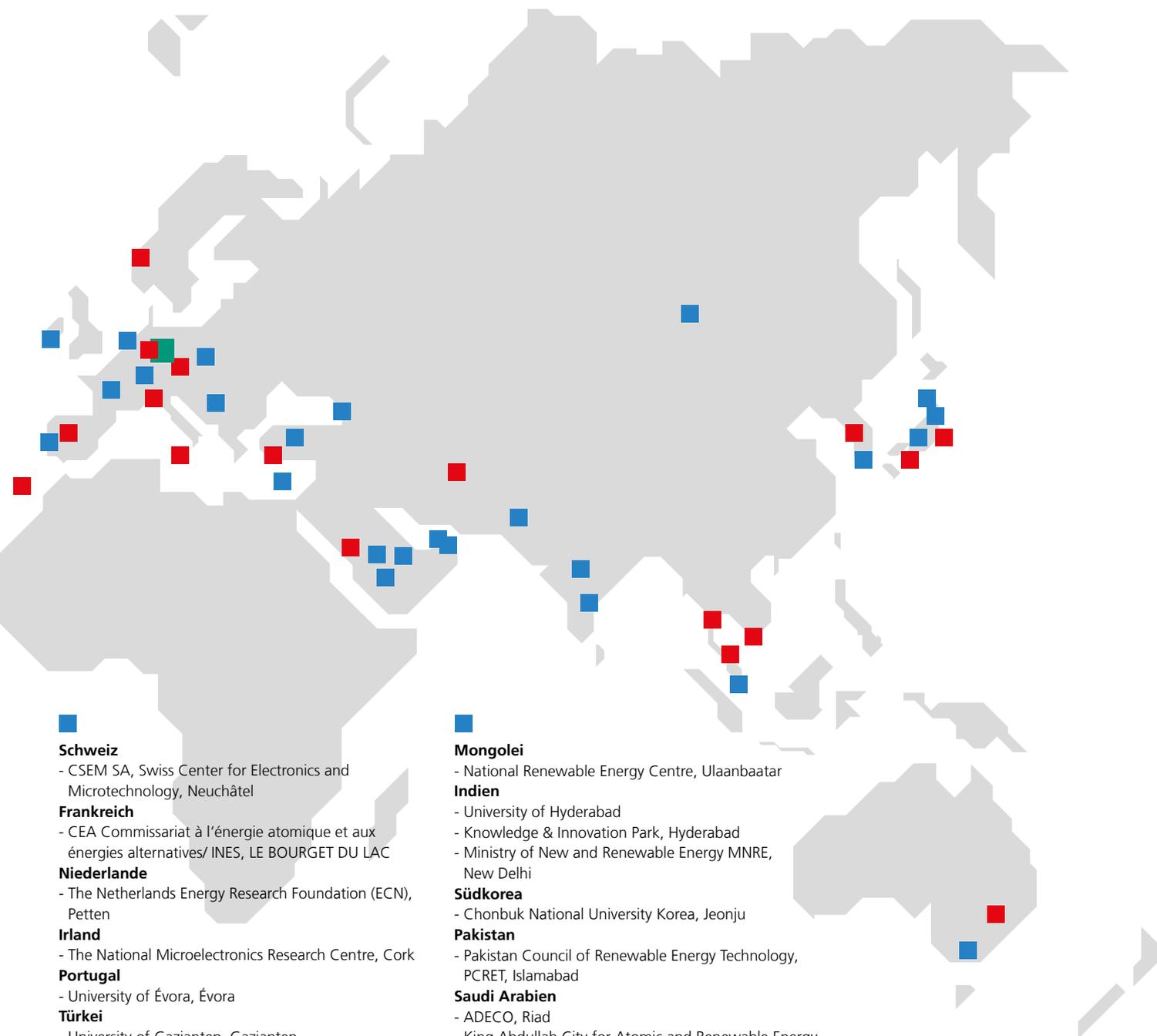
- Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE, Freiburg
- Labor- und Servicecenter Gelsenkirchen LSC, Gelsenkirchen
- Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Halle/Saale
- Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM, Freiberg



- Deutschland, Karlsruhe**
- Österreich, Graz**
- Norwegen, Trondheim**
- Italien, Alessandra**
- Italien, Palermo**
- Spanien, Madrid**
- Spanien, La Laguna**
- Türkei, Izmir**
- Iran, Teheran**
- Saudi Arabien, Thuwal**

**Japan**

- National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST, Tokyo
- Präfektur Fukushima
- Inter-University Research Institute for Energy Technology Ibaraki

**Schweiz**

- CSEM SA, Swiss Center for Electronics and Microtechnology, Neuchâtel

Frankreich

- CEA Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives/ INES, LE BOURGET DU LAC

Niederlande

- The Netherlands Energy Research Foundation (ECN), Petten

Irland

- The National Microelectronics Research Centre, Cork

Portugal

- University of Évora, Évora

Türkei

- University of Gaziantep, Gaziantep

Zypern

- The Cyprus Institute, Nikosia

Polen

- Warsaw University of Technology and Institute of Electronic Materials Technology, Warschau

Kroatien

- University of Split, Split

Georgien

- Javakhishvili Tbilisi State University, Tiflis

**Mongolei**

- National Renewable Energy Centre, Ulaanbaatar

Indien

- University of Hyderabad
- Knowledge & Innovation Park, Hyderabad
- Ministry of New and Renewable Energy MNRE, New Delhi

Südkorea

- Chonbuk National University Korea, Jeonju

Pakistan

- Pakistan Council of Renewable Energy Technology, PCRET, Islamabad

Saudi Arabien

- ADECO, Riad
- King Abdullah City for Atomic and Renewable Energy, K.A.CARE, Riad

Vereinigte Arabische Emirate

- IRENA, Abu Dhabi
- Masdar City Project, Abu Dhabi

Malaysia

- Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi

Australien

- The Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Clayton South, Victoria



- Thailand, Pathumtani**
- Japan, Tokyo**
- Japan, Fuji**
- Singapur, Singapur**
- Südkorea, Seoul**
- Australien, Canberra**

IMPRESSUM

Redaktion

Christina Lotz, Jutta Ottmann, Karin Schneider (Leitung)

Presse und Public Relations

Bildnachweise

A. Aleksandravicius / shutterstock.com S. 126/128, S. 130;

badenova AG und Co. KG S. 104; Belectric, S. 116, S. 142 Abb. 1;

Ryan Carter / Crown Prince Court – Abu Dhabi S. 13 Abb. 1;

CEA S. 66; EUPVSEC / Foto: Guglielmo de' Micheli S. 12 Abb. 1;

Rolf Disch SolarArchitektur S. 118/120; ENEA S. 96;

Industrial Solar S. 68/70, S. 74; iStock.com / hxdyl S. 67;

iStock.com / jntvisual, S. 129 Abb. 2;

juwi Energieprojekte GmbH S. 64;

Achim Käflein (Titelbild); A. Laumer, Weiden S. 124;

RWE Innogy S. 76

Fotografen

Auslöser-Fotodesign Kai-Uwe Wudtke S. 1, S. 8, S. 9;

Michael Eckmann S. 54/56, S. 61 Abb. 2, S. 106/108, S. 109, S. 115,

S. 139 Abb. 2, S. 141 Abb. 1;

Thomas Ernsting S. 140;

Joscha Feuerstein S. 94, S. 98/100, S. 112/114, S. 145 Abb. 2;

Dirk Mahler S. 42 Abb. 1;

Daniel Schoenen S. 139 Abb. 1;

Timo Sigurdsson S. 12 Abb. 2, S. 75 Abb. 2, S. 85 Abb. 2, S. 89 Abb. 2;

Alexander Wekkeli S. 38/40, S. 41

Gestaltung und Druck

www.netsyn.de, Joachim Würger, Freiburg

Anschrift der Redaktion

*Fraunhofer-Institut für
Solare Energiesysteme ISE
Presse und Public Relations
Heidenhofstr. 2
79110 Freiburg
Telefon +49 761 4588-5150
Fax +49 761 4588-9342
info@ise.fraunhofer.de
www.ise.fraunhofer.de*

Bestellung von Publikationen bitte per E-Mail.

Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.

www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien

*© Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE
Freiburg, 2015*

VERANSTALTUNGEN 2015
MIT BETEILIGUNG DES FRAUNHOFER ISE

- BAU 2015, Weltleitmesse für Architektur, Materialien und Systeme, München, 19.–24.01.2015
- The 2015 European Advanced Automotive and Stationary Battery Conference, Mainz, 26.–29.01.2015
- Battery Expo und Fuel Cell Expo, Tokyo, Japan, 25.–27.02.2015
11. SiliconFOREST Workshop, Feldberg-Falkau, 01.–04.03.2015
30. Symposium Photovoltaische Solarenergie (OTTI), Kloster Banz, Bad Staffelstein, 04.–06.03.2015
- Energy Storage und Internationale Konferenz zur Speicherung Erneuerbarer Energien (IRES), Düsseldorf, 09.–11.03.2015
- KONGRESS-Forum ElektroMobilität, Berlin, 10.–11.03.2015
- Internationale Sanitär- und Heizungsmesse (ISH), Frankfurt, 10.–14.03.2015
- 5th International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics and PV-Workshop, Konstanz, 23.–25.03.2015
8. Entwicklerforum Akkutechnologien, Battery University, Aschaffenburg, 24.–26.03.2015
- nPV workshop, Konstanz, 25.–26.03.2015
- 7th International Conference on PV-Hybrids and Mini-Grids, Bad Hersfeld, 10.–11.04.2015
- 11th International Conference on Concentrator Photovoltaics (CPV-11), Aix-les-Bains, Frankreich, 13.–15.04.2015
- Hannover Messe Industrie, Hannover, 13.–17.04.2015
5. SOPHIA Workshop PV Module Reliability, Loughborough, UK, 16.–17.04.2015
- 9th SNEC PV POWER EXPO 2014, Shanghai, China, 28.–30.04.2015
25. Symposium Thermische Solarenergie (OTTI), Kloster Banz, Bad Staffelstein, 06.–08.05.2015
- PCIM Europe, Nürnberg, 19.–21.05.2015
- 4th Symposium Small PV-Applications 2015, München, 08.–09.06.2015
- Intersolar Europe, München, 10.–12.06.2015
- 42nd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, New Orleans, USA, 14.–20.06.2015
- ACHEMA 2015, Frankfurt, 15.–19.06.2015
- Intersolar North America, San Francisco, USA, 14.–16.07.2015
- 30th EUPVSEC, Hamburg, 14.–18.09.2015
- IAA, Frankfurt, 17.–27.09.2015
- 6th International Solar Air-Conditioning Conference, Rom, Italien, 24.–25.09.2015
- World of Energy Solutions 2015 / f-cell 2015, Stuttgart, 12.–14.10.2015
- Sustainability Summit, Freiburg, 19.–20.10.2015
7. eCarTec, München, 20.–22.10.2015
- 7th World Conference Photovoltaic Energy Conversion (WCPEC-7), Kyoto, Japan, 24.–28.11.2015
- Building Simulation Conference 2015, Hyderabad, Indien, 07.–09.12.2015