



Jahresbericht  
**2017/18**

*Titelfoto: Mehrfachsolarzelle aus III-V-Halbleitern und Silicium, die 33,3 % des Sonnenlichts in Strom wandelt. Die beste herkömmliche Siliciumsolarzelle erreicht dem gegenüber 26,7% Wirkungsgrad. Die höhere Leistung wird durch fünfzehn sehr dünne III-V- Halbleiterschichten ermöglicht, die zusammen eine Dicke von nur 0,002 mm haben. Die gesamte Zelle ist ca. 0,25 mm dick. Die III-V-Schichten wandeln den sichtbaren Teil des Sonnenlichts besonders effizient um. Das langwellige Licht durchdringt die III-V-Schichten und wird weiterhin in Silicium absorbiert. Die neue Zelle baut auf der vorherrschenden Silicium-Solarzellentechnologie mit mehr als 90 % Marktanteil auf, und tatsächlich lassen sich die Solarzellen äußerlich kaum unterscheiden. Gleichzeitig lassen sich so Wirkungsgrade erzielen, die in einer einfachen Siliciumsolarzelle unmöglich wären.*

# VORWORT

*Die Institutsleiter Dr. Andreas Bett (links)  
und Prof. Dr. Hans-Martin Henning (rechts).*



Das vergangene Jahr begann mit dem Wechsel der Institutsleitung, die in der neuen Konstellation der großen Bandbreite an FuE-Themen und der Größe des Fraunhofer ISE gerecht wird. Seit Januar 2017 wird das Institut erstmals durch eine Doppelspitze geführt, wobei wir beide jeweils inhaltlich für einen der beiden großen Themenbereiche und damit auch der Schwerpunkte der strategischen Ausrichtung des Instituts stehen. Dabei arbeiten wir in enger Abstimmung und sehen und vertreten das Institut immer als Einheit, zumal es auch starke Interdependenzen zwischen den Themenschwerpunkten gibt. Die Photovoltaik, für die Andreas Bett steht, ist einer der Hauptpfeiler in einer nachhaltigen Energieversorgung und steht damit in enger Wechselwirkung zu den energietechnologischen und systemischen Themen, auf die Hans-Martin Henning den Fokus richtet. Abgeleitet von diesem Verständnis des Fraunhofer ISE haben wir in den vergangenen eineinhalb Jahren einen Strukturprozess durchgeführt und im Jahr 2017 den künftigen Organisationsaufbau des Instituts etabliert. Neben der thematischen Ausrichtung auf zwei große Bereiche – »Photovoltaik« und »Energietechnologien und -systeme« – haben wir auch die Organisationseinheiten darunter neu strukturiert, um so den Herausforderungen der Energiewende und unserer Kunden noch besser begegnen zu können.

Der Bereich Photovoltaik musste zu Anfang des Jahres durch einen Brand ein einschneidendes Ereignis verkraften. Das Hauptlabor des PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center wurde weitgehend zerstört. Seit 2006 stellt das PV-TEC eine weltweit einmalige und sehr erfolgreiche Forschungsplattform für Produktionstechnologien zur Herstellung von Solarzellen dar. Wir arbeiten daher mit Nachdruck daran, das PV-TEC wieder aufzubauen, um unseren Industriekunden diese Dienstleistungen, die mit Zeitverzögerungen teilweise in anderen Labors aufgefangen werden konnten, wieder in

vollstem Umfang anbieten zu können. Als Institutsleiter möchten wir an dieser Stelle allen an den Löscharbeiten und dem Wiederaufbau Beteiligten unseren großen Dank aussprechen. Dies gilt auch für die zahlreichen Sympathiebekundungen und Hilfsangebote von extern, die uns unmittelbar nach dem Brand erreichten. Im Frühjahr 2018 werden wir das neue PV-TEC einweihen.

Für das Fraunhofer ISE war 2017 wieder ein sehr erfolgreiches Jahr. In der Photovoltaik konnten wir zahlreiche Rekordwirkungsgrade für Solarzellen verzeichnen, so den Weltrekord für multikristalline Siliciumsolarzellen mit 22,3 Prozent. Für monokristalline Siliciumsolarzellen mit TOPCon Technologie konnte der Wert auf 25,7 Prozent gesteigert werden. Mit unserem monolithischen Tandemansatz mit Silicium als Basiszelle wollten wir das theoretische Wirkungsgradlimit von 29,4 Prozent für Siliciummaterial überschreiten. Mit den ersten Prototypen, die einen Wirkungsgrad von 33,3 Prozent erzielten, ist uns dies erfolgreich gelungen. Für uns ist dies ein wichtiger Schritt für die weitere technologische Entwicklung der Photovoltaik, die wir auch im neuen Laborgebäude »Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen« weiterführen werden, für das wir im Herbst den Grundstein legen konnten und dessen Fertigstellung für 2019 geplant ist. Unser Dank gilt Bund und Land für die Finanzierung. Im Oktober feierte das Fraunhofer-Zentrum für Siliziumphotovoltaik CSP, die gemeinsame Einrichtung des Fraunhofer ISE mit dem Fraunhofer IMWS in Halle an der Saale, sein zehnjähriges Jubiläum.

Auch im Bereich »Energietechnologien und -systeme« gab es zahlreiche Erfolge zu verzeichnen. Dazu zählen die Arbeiten zur kompakten Bauweise von Wechselrichtern ebenso wie die Entwicklung einer leistungsfähigen und universell einsetzbaren Energiemonitoring-Plattform für Gebäude. Ein auf einer sehr frühen Idee unseres Institutsgründers Prof. Adolf Goetzberger

beruhendes Projekt, die Agrophotovoltaik, konnte jetzt im ersten Erntejahr das erfolgreiche Ergebnis einer um 60 Prozent optimierten Landnutzung durch die Verbindung von Stromerzeugung mit landwirtschaftlicher Bebauung verkünden. Im Geschäftsfeld »Wasserstofftechnologien« gibt es mit der Inbetriebnahme einer Power-to-Gas-Einspeiseanlage, der Einspeisung von per Elektrolyse erzeugtem Wasserstoff in das Erdgasnetz, einen wichtigen Meilenstein zu berichten.

Die deutschen Wissenschaftsakademien acatech, Leopoldina und Union der deutschen Wissenschaftsakademien veröffentlichten im November eine Stellungnahme mit dem Titel »Sektorkopplung – Optionen für die nächste Phase der Energiewende«. Wesentliche Ergebnisse basieren auf Rechnungen mit dem am Fraunhofer ISE entwickelten Rechenmodell »REMod« für die detaillierte Analyse der Entwicklungspfade von Gesamtenergiesystemen. Die Studie wurde von der Arbeitsgruppe »Sektorkopplung« im Projekt »Energiesysteme der Zukunft« (ESYS) unter gemeinsamer Leitung von Hans-Martin Henning und Eberhard Umbach, Mitglied des Präsidiums von acatech, erarbeitet.

Die Ergebnisse dieser Studie bestätigen unsere eigenen Arbeiten zu den für die Energiewende relevanten Technologien und bestärken uns in der Wahl der strategischen Entscheidungen, die wir für den Bereich »Energietechnologien und -systeme« getroffen haben und die in 2018 stark zum Tragen kommen werden. So haben wir beschlossen, die Batterieforschung weiter auszubauen, mit der Neugründung der Abteilung »Elektrische Energiespeicher«, in der wir über die Batterieprüfung und -systementwicklung hinausgehend auch Arbeiten zur Batteriezellproduktion aufbauen. Dabei kommt uns das in der Photovoltaikforschung erworbene Know-how hinsichtlich Materialien, Prozessen und Produktionstechnologien zugute. Ein weiterer strategischer Schwerpunkt ist

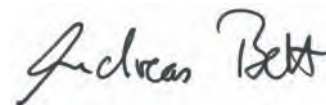
die Leistungselektronik. Hier werden wir 2018 ein neues, leistungsfähiges Multimegawattlabor fertigstellen, in dem wir Hochleistungselektronik-Komponenten prüfen und entwickeln können – ein zentrales Thema im Hinblick auf die Stabilität der Stromnetze in einem stark auf volatilen Erzeugern basierenden Energieversorgungssystem.

Ein wichtiges Instrument für die strategische Ausrichtung der FuE-Themen des Fraunhofer ISE sind die Strategie-Audits. In 2017 haben wir unsere Wasserstofftechnologie einem Audit unterzogen, 2018 folgt die Photovoltaik.

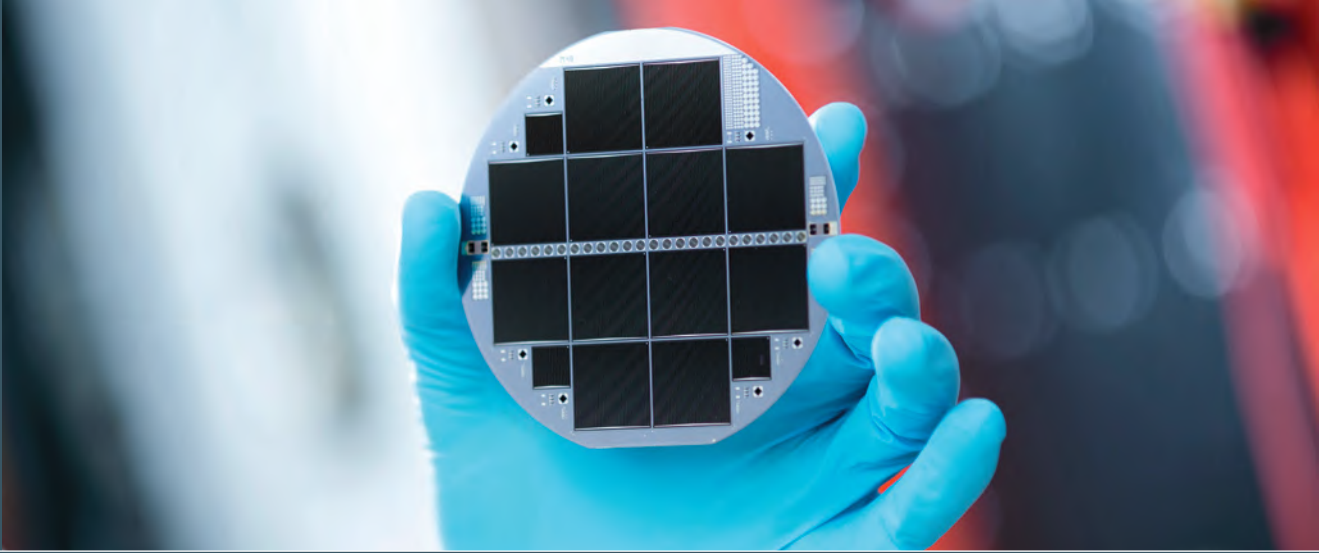
Für die Unterstützung und Förderung des Fraunhofer ISE sowie für die gute Zusammenarbeit bedanken wir uns herzlich bei unseren Kuratoren, Auditoren, Stipendiengebern, Ansprechpartnern und Förderern in den Ministerien auf Bundes- und Länderebene und bei den Projektträgern sowie unseren Projektpartnern. Wir freuen uns auf die vor uns liegenden spannenden Jahre, um gemeinsam mit unseren Partnern beizutragen zur weiteren Umsetzung der Energiewende in Deutschland und global – hin zu einer nachhaltigen Energieversorgung auf Basis erneuerbarer Energien.



Prof. Dr. Hans-Martin Henning



Dr. Andreas Bett



---

## Unsere Vision

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE betreibt anwendungsorientierte Forschung und Entwicklung mit dem Ziel einer nachhaltigen, wirtschaftlichen, sicheren und sozial gerechten Energieversorgung weltweit.

---

## Unsere Mission

Das Institut entwickelt technische Lösungen zur Nutzung erneuerbarer Energiequellen und zur Erhöhung der Energieeffizienz. Es trägt mit seinen system- und technologieorientierten Innovationen sowohl zur Wettbewerbsfähigkeit seiner Kunden als auch zur gesellschaftlichen Akzeptanz nachhaltiger Energiesysteme bei. Das Fraunhofer ISE hat den Anspruch, durch herausragende Forschungsergebnisse und erfolgreiche Projekte, Kooperationen und Firmenausgründungen eine weltweit führende Position als Forschungsinstitut im Bereich effizienter und solarer Energiesysteme einzunehmen und weiter auszubauen. Damit will es einen Beitrag zur Transformation des Energieversorgungssystems hin zur effizienten Nutzung von schließlich nur noch erneuerbaren Energien leisten. Um optimale Ergebnisse zu erzielen, arbeitet das Institut weltweit mit renommierten Partnern zusammen. Es ist unser Bestreben, exzellente wissenschaftliche Forschung und Entwicklung mit wirtschaftlichem Erfolg, industrieller Umsetzung und technischem Fortschritt zu verbinden.

---

## Unser Fundament

Das Fraunhofer ISE ist das größte Solarforschungsinstitut in Europa. Die erfolgreiche Arbeit basiert auf sieben Säulen, die das Selbstverständnis des Instituts beschreiben:

- » hervorragend ausgebildete und motivierte Mitarbeitende
- » moderne und leistungsfähige Forschungsinfrastruktur
- » breites Themenspektrum und Systemkompetenz
- » langjährige Erfahrung und Expertise
- » anerkannte Analyse- und Prüfkompetenz
- » erfolgreiches, projektfinanziertes Geschäftsmodell
- » nationale und internationale Vernetzung

# INHALTSVERZEICHNIS

|  |           |   |           |
|--|-----------|---|-----------|
|  |           | <b>PHOTOVOLTAIK</b>   | <b>24</b> |
| <b>Vorwort</b>   | <b>1</b>  | <b>Silicium-Photovoltaik</b>  | <b>26</b> |
| <b>Vision, Mission, Fundament</b>  | <b>3</b>  | Diamantdrahtgesägtes High Performance<br>multikristallines Silicium         | 28        |
| <b>Organisationsstruktur</b>   | <b>6</b>  | Solarzellen-Produktionstechnologie – Dispensen<br>von Metallkontakten       | 29        |
| <b>Kuratorium</b>  | <b>7</b>  | Defekte durch lichtinduzierte Degradation in<br>multikristallinem Silicium  | 30        |
| <b>Die Fraunhofer-Gesellschaft</b>   | <b>8</b>  | Neuartige passivierende Kontakte  | 31        |
| <b>Außenstellen, Kooperationen,<br/>Vernetzung</b>                               | <b>9</b>  | <b>III-V- und Konzentrator-Photovoltaik</b>                                 | <b>32</b> |
| <b>Das Fraunhofer-Institut für<br/>Solare Energiesysteme ISE</b>                 | <b>10</b> | Kostengünstige Epitaxieprozesse für III-V-Halbleiter                        | 34        |
| <b>Das Institut in Zahlen</b>  | <b>12</b> | Hocheffiziente photovoltaische Laserleistungszellen                         | 35        |
| <b>Promotionen</b>   | <b>14</b> | <b>Neuartige Photovoltaik-Technologien</b>                                  | <b>36</b> |
| <b>Preise und Auszeichnungen</b>   | <b>16</b> | Mehrfachsolarzellen aus kristallinem Si und<br>III-V-Verbindungshalbleitern | 38        |
| <b>Nachhaltigkeit</b>  | <b>17</b> | Druckbare in situ Perovskitsolarzellen                                      | 39        |
| <b>Partner der Industrie</b>   | <b>18</b> | <b>Photovoltaische Module und Kraftwerke</b>                                | <b>40</b> |
| <b>Neue Strukturen und<br/>neue Schwerpunkte</b>                                 | <b>20</b> | Photovoltaik auf Nutzfahrzeugen   | 42        |
| <b>Batterieforschung – zukünftige<br/>Ausrichtung und Projekt-<br/>beispiele</b> | <b>22</b> | Satellitendaten und Echtzeit-Strahlungsmessungen<br>für PV-Hochrechnung     | 43        |

## ENERGIETECHNOLOGIEN UND -SYSTEME 44

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Solarthermie</b>  | <b>46</b> |
| Solarthermische Kraftwerke mit geringem Wasserverbrauch        | 48        |
| Innovative Ansätze für die solare Wärmeversorgung von Gebäuden | 49        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Gebäudeenergietechnik</b>                   | <b>50</b> |
| Attraktive und kostengünstige BIPV-Bauprodukte | 52        |
| Wärmepumpen mit klimafreundlichen Kältemitteln | 53        |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Wasserstofftechnologien</b>                                       | <b>54</b> |
| Ökonomische und ökologische Evaluation von Power-to-Liquid-Prozessen | 56        |
| Leistungs- und Alterungsverhalten von Brennstoffzellen-Komponenten   | 57        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Energiesystemtechnik</b>                                       | <b>58</b> |
| Leistungselektronik und Netztechnologien im Multi-MW-Bereich      | 60        |
| Aufbau- und Kühlungstechnik                                       | 61        |
| Wechselrichter im Stromnetz                                       | 61        |
| Digitale Methoden und Werkzeuge für Gebäude und Netze der Zukunft | 62        |
| Netzdienlicher Betrieb von KWK-Anlagen                            | 62        |
| Berechnung nachhaltiger lokaler Energiesysteme mit »KomMod«       | 63        |
| Daten und Modelle für die Energiesystemanalyse                    | 63        |

## AKKREDITIERTE LABORS 64

|                                 |    |
|---------------------------------|----|
| CalLab PV Cells                 | 65 |
| CalLab PV Modules               | 66 |
| TestLab PV Modules              | 67 |
| TestLab Solar Façades           | 68 |
| TestLab Solar Thermal Systems   | 69 |
| TestLab Power Electronics       | 70 |
| TestLab Heat Pumps and Chillers | 71 |

## FuE-INFRASTRUKTUR 72

|  |    |
|--|----|
| Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen                               | 73 |
| Zentrum für Optik und Oberflächenforschung                             | 74 |
| Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse        | 75 |
| Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme                   | 76 |
| Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe | 77 |
| PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center                     | 78 |
| Module-TEC – Module Technology Evaluation Center                       | 79 |
| Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center                    | 80 |

## Impressum 81



# ORGANISATIONSSTRUKTUR

Die Organisationsstruktur des Fraunhofer ISE gliedert sich neben Business Administration, Facility Management und Stabsstellen in die beiden wissenschaftlichen Bereiche Photovoltaik sowie Energietechnologien und -systeme.

In der Außendarstellung operieren wir zudem mit markt-orientierten Geschäftsfeldern:

---

## Photovoltaik

- » Silicium-Photovoltaik
- » III-V- und Konzentratoren-Photovoltaik
- » Neuartige Photovoltaik-Technologien
- » Photovoltaische Module und Kraftwerke

---

## Energietechnologien und -systeme

- » Solarthermie
- » Gebäudeenergietechnik
- » Wasserstofftechnologien
- » Energiesystemtechnik

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), Prof. Dr. Volker Wittwer (stellvertretender Institutsleiter 1997–2009) und Prof. Dr. Eicke R. Weber (Institutsleiter 2006–2016).

*V. l. n. r.: Prof. Dr. Hans-Martin Henning, Dr. Harry Wirth, Dr. Andreas Bett, Dr. Olivier Stalter, Dr. Ralf Preu, Karin Schneider, Prof. Dr. Stefan Glunz, Dr. Christopher Hebling, Dr. Sonja Reidel, Jochen Vetter, Dr. Peter Schossig.*

---

## Institutsleitung

Prof. Dr. Hans-Martin Henning | Telefon: +49 761 4588-5134  
Dr. Andreas Bett | Telefon: +49 761 4588-5257

---

## Bereichsleitung Photovoltaik

Prof. Dr. Stefan Glunz | Telefon: +49 761 4588-5191  
Dr. Ralf Preu | Telefon: +49 761 4588-5260  
Dr. Harry Wirth | Telefon: +49 761 4588-5858

---

## Bereichsleitung Energietechnologien und -systeme

Dr. Christopher Hebling | Telefon: +49 761 4588-5195  
Dr. Peter Schossig | Telefon: +49 761 4588-5130  
Dr. Olivier Stalter | Telefon: +49 761 4588-5467

---

## Verwaltungsleitung – Business Administration

Dr. Sonja Reidel | Telefon: +49 761 4588-5668

## Verwaltungsleitung – Facility Management

Jochen Vetter | Telefon: +49 761 4588-5214

## Presse und Public Relations

Karin Schneider M.A. | Telefon: +49 761 4588-5150



# KURATORIUM

---

## Vorsitzender

**Dr. Carsten Voigtländer**

Vaillant Group, Remscheid

---

## Stellvertretender Vorsitzender

**Dr. Hubert Aulich**

SC Sustainable Concepts GmbH, Erfurt

---

## Mitglieder

**Dr. Klaus Bonhoff**

NOW GmbH, Nationale Organisation Wasserstoff- und Brennstoffzellentechnologie, Berlin

**Ullrich Bruchmann**

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Berlin

**Ministerialdirigent Martin Eggstein**

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

**Dipl.-Ing. Daniel Etschmann**

Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt

**Burkhard Holder**

VDE Renewables GmbH, Alzenau

**Dipl.-Ing. Helmut Jäger**

Solvis GmbH & Co. KG, Braunschweig

**Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus**

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg, Stuttgart

**Sylvère Leu**

Meyer Burger Technology AG, Gwatt, Schweiz

**Dr. Dirk-Holger Neuhaus**

SolarWorld Industries GmbH, Freiberg

**Dr. Norbert Pralle**

Ed. Züblin AG, Stuttgart

**Dr. Klaus-Dieter Rasch**

AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn

**Prof. Dr. Leonhard Reindl**

Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg

**Prof. Dr. Frithjof Staiß**

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

**Prof. Andreas Wagner**

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe

*Das Kuratorium begutachtet die Forschungsprojekte und berät die Institutsleitung und den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft bezüglich des Arbeitsprogramms des Fraunhofer ISE (Stand: 31.12.2017).*

# DIE FRAUNHOFER-GESELLSCHAFT



Forschen für die Praxis ist die zentrale Aufgabe der Fraunhofer-Gesellschaft. Die 1949 gegründete Forschungsorganisation betreibt anwendungsorientierte Forschung zum Nutzen der Wirtschaft und zum Vorteil der Gesellschaft. Vertragspartner und Auftraggeber sind Industrie- und Dienstleistungsunternehmen sowie die öffentliche Hand.

Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt in Deutschland derzeit 72 Institute und Forschungseinrichtungen. Mehr als 25 000 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, überwiegend mit natur- oder ingenieurwissenschaftlicher Ausbildung, erarbeiten das jährliche Forschungsvolumen von 2,3 Milliarden Euro. Davon fallen knapp 2 Milliarden Euro auf den Leistungsbereich Vertragsforschung. Rund 70 Prozent dieses Leistungsbereichs erwirtschaftet die Fraunhofer-Gesellschaft mit Aufträgen aus der Industrie und mit öffentlich finanzierten Forschungsprojekten. Rund 30 Prozent werden von Bund und Ländern als Grundfinanzierung beigesteuert, damit die Institute Problemlösungen entwickeln können, die erst in fünf oder zehn Jahren für Wirtschaft und Gesellschaft aktuell werden.

Internationale Kooperationen mit exzellenten Forschungspartnern und innovativen Unternehmen weltweit sorgen für einen direkten Zugang zu den wichtigsten gegenwärtigen und zukünftigen Wissenschafts- und Wirtschaftsräumen.

Mit ihrer klaren Ausrichtung auf die angewandte Forschung und ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien spielt die Fraunhofer-Gesellschaft eine zentrale Rolle im Innovationsprozess Deutschlands und Europas. Die Wirkung der angewandten Forschung geht über den direkten Nutzen für die Kunden hinaus: Mit ihrer Forschungs- und Entwicklungsarbeit tragen die Fraunhofer-Institute zur Wettbewerbsfähigkeit der Region, Deutschlands und Europas bei. Sie fördern Innovationen, stärken die technologische Leistungsfähigkeit, verbessern die Akzeptanz moderner Technik und sorgen für Aus- und Weiterbildung des dringend benötigten wissenschaftlich-technischen Nachwuchses.

Ihren Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern bietet die Fraunhofer-Gesellschaft die Möglichkeit zur fachlichen und persönlichen Entwicklung für anspruchsvolle Positionen in ihren Instituten, an Hochschulen, in Wirtschaft und Gesellschaft. Studierenden eröffnen sich aufgrund der praxisnahen Ausbildung und Erfahrung an Fraunhofer-Instituten hervorragende Einstiegs- und Entwicklungschancen in Unternehmen.

Namensgeber der als gemeinnützig anerkannten Fraunhofer-Gesellschaft ist der Münchner Gelehrte Joseph von Fraunhofer (1787–1826). Er war als Forscher, Erfinder und Unternehmer gleichermaßen erfolgreich.

<sup>1</sup> *Das Gebäude der Fraunhofer-Gesellschaft in München.*

© *Fraunhofer-Gesellschaft*

# AUSSENSTELLEN, KOOPERATIONEN, VERNETZUNG

1

Neben dem Hauptsitz in Freiburg unterhält das Fraunhofer ISE drei Außenstellen – eine davon gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS in Halle, eine andere mit dem Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie IISB in Freiberg. Das Institut ist an zwei internationalen Kooperationen direkt beteiligt und unterhält Memorandums of Understanding mit rund 40 Forschungseinrichtungen weltweit. Unter anderem ist es Mitglied im Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE) und der Association of European Renewable Energy Research Centres (EUREC). Gemeinsam mit dem National Renewable Energy Laboratory NREL in USA und dem National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST in Japan ist es zur Global Alliance of Solar Research Institutes (GA-SERI) zusammengeschlossen.

## Außenstandorte des Fraunhofer ISE

- » Fraunhofer ISE Labor- und Servicecenter LSC in Gelsenkirchen: produktionsnahe Prozessentwicklung für Silicium-Dünnschichtsolarzellen, Silicium-Heterosolarzellen sowie multikristalline Solarzellen
- » Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Halle/Saale: Kristallisationstechnologie (CSP-LKT), Recycling von PV-Modulen
- » Fraunhofer Technologiezentrum Halbleitermaterialien THM, Freiberg: Herstellung von kristallinen Werkstoffen und Vereinzelung des hergestellten Grundmaterials

## Internationale Kooperationen

- » Fraunhofer Center for Sustainable Energy Systems CSE, Boston, USA und CFV Solar Test Laboratory in Albuquerque, New Mexico
- » Fraunhofer Chile Research – Centro para Tecnologías en Energía Solar (FCR-CSET), Santiago, Chile: Solare Stromerzeugung, Aufbereitung von Wasser und Prozesswärme

## Fraunhofer-Allianz Energie

Das Fraunhofer ISE ist nicht nur eines der derzeit 18 Mitgliedsinstitute der Fraunhofer-Allianz Energie, sondern seit ihrer Gründung im Jahr 2003 auch Sitz der Geschäftsstelle. Im Dezember 2016 wurde Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning zum neuen Sprecher der Allianz gewählt. Als einer der größten Energieforschungsverbände Europas bietet die Fraunhofer-Allianz Energie Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen in den Bereichen erneuerbare Energien, Speichertechnologien, Energieeffizienz sowie Komponenten und Konzepte für Anlagen, Gebäude und Quartiere.

## Weitere Vernetzung in der Fraunhofer-Gesellschaft

- » Fraunhofer-Allianzen 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

## Leistungszentrum Nachhaltigkeit in Freiburg

Das 2015 gegründete transdisziplinäre Forschungsnetzwerk besteht aus der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und den fünf Fraunhofer-Instituten vor Ort. Im Mittelpunkt stehen Forschung und Lehre zu Themen der Nachhaltigkeit sowie die Entwicklung innovativer Produkte und Dienstleistungen gemeinsam mit Unternehmen aus der Region. Den ingenieurwissenschaftlichen Kern des Leistungszentrums bildet das »Institut für Nachhaltigkeit und Technische Systeme (INaTech)« an der Universität Freiburg mit seinen Schwerpunkten Nachhaltige Materialien, Energiesysteme und Resilienz.

# DAS FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

Das 1981 in Freiburg im Breisgau gegründete Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE ist mit 1200 Mitarbeitern das größte europäische Solarforschungsinstitut.

Das Fraunhofer ISE setzt sich für ein nachhaltiges, wirtschaftliches, sicheres und sozial gerechtes Energieversorgungssystem auf der Basis erneuerbarer Energien ein. Im Rahmen der Forschungsschwerpunkte Energieeffizienz, Energiegewinnung, Energieverteilung und Energiespeicherung schafft es technische Voraussetzungen für eine effiziente und umweltfreundliche Energieversorgung, sowohl in Industrie- als auch in Schwellen- und Entwicklungsländern. Das Institut finanziert sich neben einer Grundfinanzierung über die Fraunhofer-Gesellschaft zu rund 85 % durch Aufträge in den Bereichen angewandte Forschung, Entwicklung und Hochtechnologie-Dienstleistungen. Das Fraunhofer ISE ist nach der Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001:2008 zertifiziert.

Zusammen mit Kunden und Partnern aus Wirtschaft, Politik und Gesellschaft entwickelt das Fraunhofer ISE konkret umsetzbare technische Lösungen. In seinen fünf Geschäftsfeldern erforscht und entwickelt es Materialien, Komponenten, Systeme und Verfahren. Das Institut bietet auch Prüf- und Zertifizierungsleistungen in seinen sieben akkreditierten Test- und Kalibrierlabors an. Basis der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten des Fraunhofer ISE ist eine hochmoderne, technische Infrastruktur, die sich in stärker grundlagenorientierte Forschungs- und Entwicklungszentren sowie produktionsnahe Technologieevaluationszentren gliedert.

## Geschäftsfelder

Die beiden großen organisatorischen Bereiche des Fraunhofer ISE – »Photovoltaik« sowie »Energietechnologien und -systeme« – bedienen fünf marktorientierte Geschäftsfelder:

### Geschäftsfeld Photovoltaik

- » Silicium-Photovoltaik
- » III-V- und Konzentrator-Photovoltaik
- » Neuartige Photovoltaik-Technologien
- » Photovoltaische Module und Kraftwerke

### Geschäftsfeld Solarthermie

- » Materialforschung und Optik
- » Thermische Kollektoren und Komponenten
- » Thermische Anlagentechnik
- » Thermische Speicher für Kraftwerke und Industrie
- » Wasseraufbereitung

### Geschäftsfeld Gebäudeenergietechnik

- » Gebäudehülle
- » Wärme- und Kälteversorgung
- » Betriebsführung und Gesamtenergiekonzepte
- » Thermische Speicher für Gebäude
- » Materialien und Komponenten für Wärmetransformation

### Geschäftsfeld Wasserstofftechnologien

- » Thermochemische Prozesse
- » Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse
- » Brennstoffzellensysteme

### Geschäftsfeld Energiesystemtechnik

- » Leistungselektronik
- » IKT für Energiesysteme
- » Systemintegration – Strom, Wärme, Gas
- » Batteriesysteme für stationäre und mobile Anwendungen
- » Energiesystemanalyse



### FuE-Infrastruktur

Das Fraunhofer ISE zeichnet sich durch seine hervorragende technische Infrastruktur aus. 15 700 m<sup>2</sup> Laborfläche mit modernen Geräten und Anlagen sind Grundlage unserer Forschungs- und Entwicklungskompetenzen. Die FuE-Infrastruktur des Fraunhofer ISE gliedert sich in acht Laborzentren sowie vier produktionsnahe Technologieevaluationszentren:

- » Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen
- » Zentrum für neuartige PV-Technologien
- » Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien
- » Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme
- » Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse
- » Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze
- » Zentrum für Optik und Oberflächen
- » Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe
- » SiM-TEC – Silicon Materials Technology Evaluation Center
- » PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center
- » Module-TEC – Module Technology Evaluation Center
- » Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center

### Serviceleistungen in akkreditierten Labors

Zudem bietet das Fraunhofer ISE unabhängige Prüf- und Zertifizierungsleistungen an. Dazu verfügt das Institut ergänzend zu den Forschungs- und Entwicklungszentren über sieben akkreditierte Test- und Kalibriereinrichtungen. Sie bieten mit ihrer jeweiligen Mess- und Prüfausstattung Dienstleistungen für Unternehmen und wissenschaftliche Einrichtungen an:

- » CalLab PV Cells
- » CalLab PV Modules
- » TestLab PV Modules
- » TestLab Solar Façades
- » TestLab Solar Thermal Systems
- » TestLab Power Electronics
- » TestLab Heat Pumps and Chillers

### Angebotspektrum

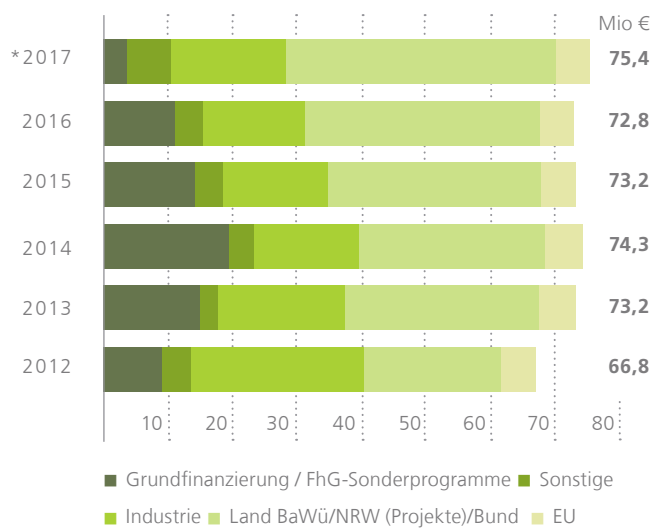
Durch seine Forschungsaktivitäten entwickelt das Fraunhofer ISE neue Produkte, Verfahren oder Dienstleistungen und optimiert bestehende. Dafür findet das Institut zukunftsweisende technische Lösungen bzw. transferiert Technologien aus Wissenschaft und Forschung in Wirtschaft und Gesellschaft. Als Partner der Industrie orientiert es sich an den Bedürfnissen der Kunden und leistet einen Beitrag zu deren wirtschaftlicher Wertschöpfung. Gerade kleine und mittelständische Unternehmen ohne eigene FuE-Abteilung erhalten durch die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE Zugang zu hochleistungsfähiger Laborinfrastruktur und exzellenten Forschungsleistungen.

Das Institut setzt FuE-Projekte auf unterschiedlichen Stufen im Lebenszyklus von Technologien um. Je nach Auftrag und Bedarf des Kunden oder Reifegrad einer Technologie bietet das Institut unterschiedliche Leistungen an:

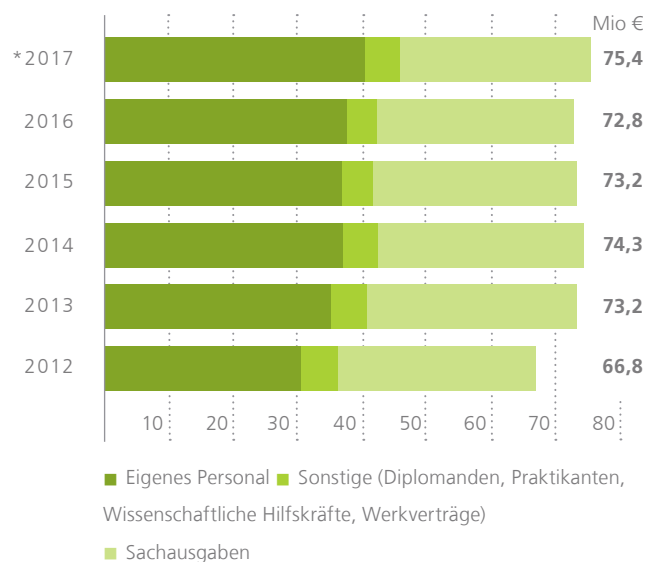
- » Neues Material / Verfahren
- » Prototyp / Kleinserie
- » Patent / Lizenz
- » Software / Anwendung
- » Messtechnische Analyse / Qualitätssicherung
- » Beratung / Planung / Studie
- » Dienstleistungen (Messen, Prüfen, Monitoring)

# DAS INSTITUT IN ZAHLEN

## Entwicklung der Erträge\*\*

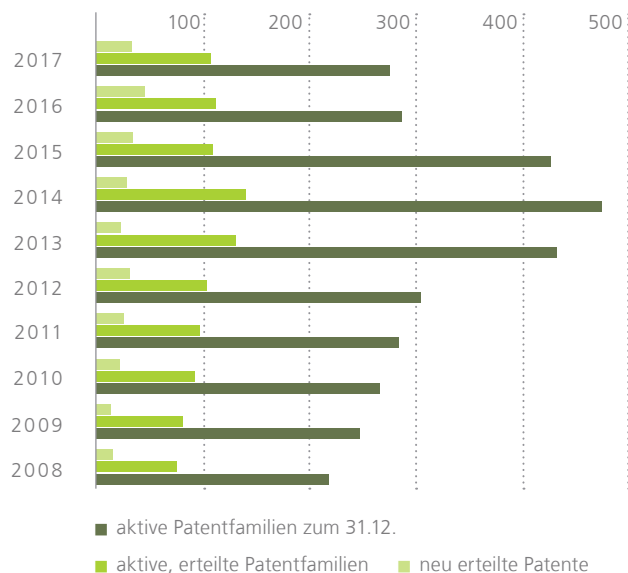


## Entwicklung der Ausgaben\*\*

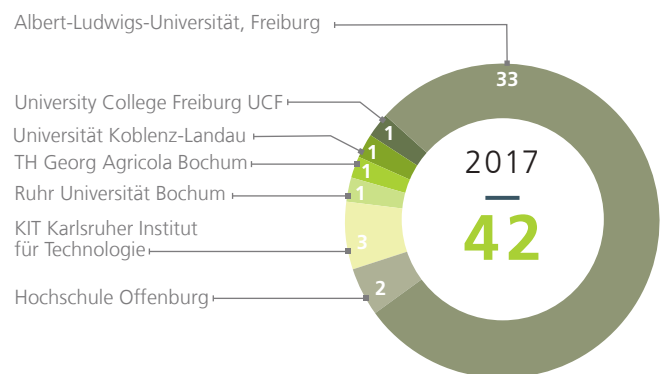


\*vorläufig \*\*ohne Investitionen – Der Gesamthaushalt 2017 (inklusive Investitionen) betrug 89,4 Mio €.

## Patente

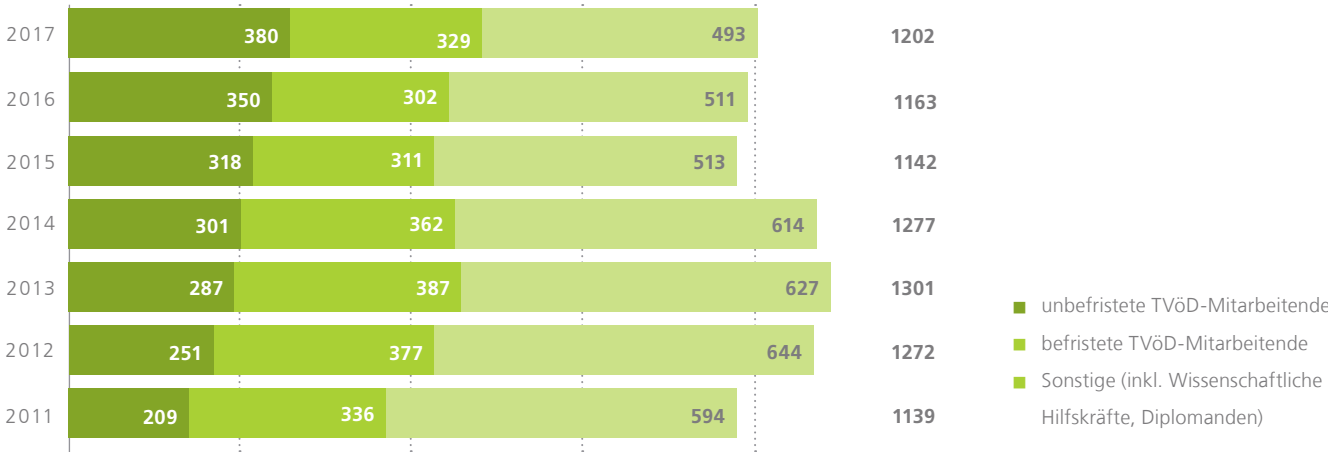


## Lehrveranstaltungen

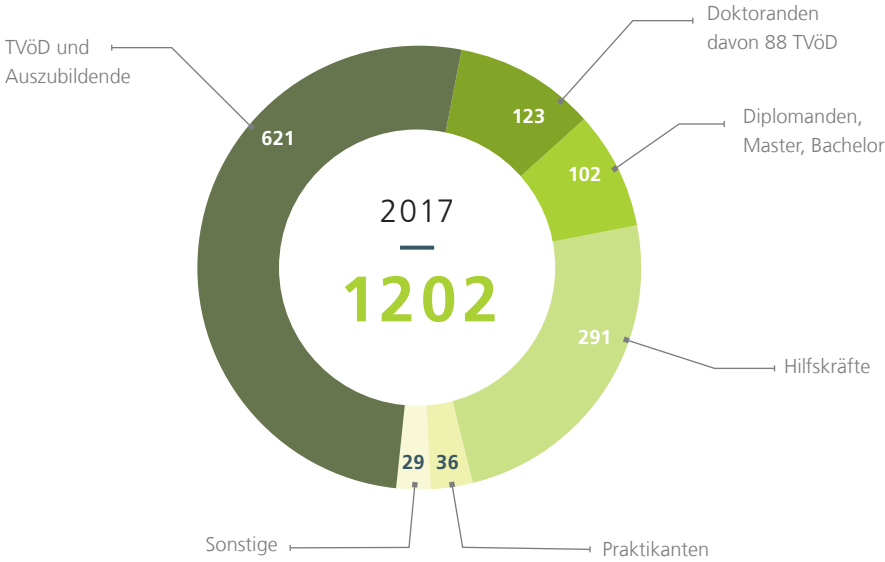


32 Wissenschaftler des Fraunhofer ISE sind neben ihrer Forschungsarbeit auch in der Lehre tätig.

Entwicklung der Mitarbeiterzahlen



Mitarbeitende – Personalstruktur 2017



# PROMOTIONEN

## **Karolina Baltins**

»Global Assessment of Environmental Stress Factors for Solar Technology Applications Using Geographical Information Systems«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2017

## **Kilian Dallmer-Zerbe**

»Probabilistische Planung von Verteilnetzen unter Berücksichtigung von dezentralen Energieanlagen«  
Technische Universität Dresden, 2017

## **Johannes Eisenlohr**

»Light Trapping in High-Efficiency Crystalline Silicon Solar Cells«  
Universität Konstanz, 2017

## **Karoline Fath**

»Potential for Photovoltaic Systems on Buildings in Germany«  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017

## **Stefan Feuerhahn**

»Analysis and Evaluation of the IEC 61850 Communication Standard for Monitoring and Control of Distributed Energy Resources«  
Technische Universität Dortmund, 2017

## **David Fischer**

»Integrating Heat Pumps into Smart Grids – A Study on System Design, Controls and Operation«  
KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, Schweden

## **Dominik Fröhlich**

»Structural and Stability Investigations of Metal-Organic Frameworks under Humid Conditions for Heat Transformation Applications«  
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, 2017

## **Ino Geisemeyer**

»Characterization of Crystalline Silicon Solar Cells under Realistic Operating Conditions«  
Universität Konstanz, 2017

## **Bishal Kafle**

»Mask-less Dry Texturing of Crystalline Silicon Solar Cells in Atmospheric Pressure Conditions«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2017

## **Sven Killinger**

»Anlagenscharfe Simulation der PV-Leistung basierend auf Referenzmessungen und Geodaten«  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017

## **Konstantin Klein**

»Quantifying the Energy Flexibility of Building Energy Systems: Evaluation of Grid-supportive Concepts for Space Heating and Cooling in Non-residential Buildings«  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017

## **Karin Krauß**

»Multicrystalline Silicon Solar Cell Concepts and Light-induced Degradation«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2017



**Saskia Kühnhold-Pospischil**

»Oberflächen-Passivierung von kristallinem Silicium durch Aluminiumoxid«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2017

**Martin Lieder**

»Metallstrukturierung und Dotierung mit Elementen der III.-Hauptgruppe auf Siliziumsubstraten mit Hilfe von Laser-chemischen Prozessen«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2017

**Andreas Lorenz**

»Evaluierung von Rotationsdruckverfahren für die Metallisierung von Silicium-Solarzellen«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2017

**Thomas Mißbach**

»Entwicklung eines Lichtmodulator-basierten Messsystems zur Bestimmung der externen Quanteneffizienz von Mehrfach-solarzellen«

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017

**Tim Niewelt**

»Lifetime-limiting Defects in Monocrystalline Silicon«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2017

**Maximilian Pospischil**

»Entwicklung eines Dispensiersystems mit Paralleldruckkopf zur kontaktlosen Vorderseitenmetallisierung von Silicium-wafern im industriellen Maßstab«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2017

**Sarah Röttinger**

»Organic Solar Cells Based on Vacuum Processed Small Molecules – Device Characteristics, Processing and Stability Aspects«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2017

**Ammar Salman**

»Blindleistungs-Spannungsregelung zur optimierten Einbindung dezentraler Energieerzeugungsanlagen in das Stromnetz«

Universität Kassel, 2017

**Bernd Steinhauser**

»Passivating Dopant Sources for High-Efficiency n-type Silicon Solar Cells«

Universität Konstanz, 2017

**Heiko Steinkemper**

»Numerical Simulation of Silicon Solar Cells«

Universität Konstanz, 2017

**Charlotte Weiss**

»New Silicon Nanocrystal Materials for Photovoltaic Applications«

Friedrich-Schiller-Universität Jena, 2017

# PREISE UND AUSZEICHNUNGEN

**Sönke Rogalla, Stefan Schönberger, Patrick Hercegfi, Benjamin Stickan** | 1. Posterpreis für »NETfficient – Hochkompakter und modularer Batterieumrichter für zukünftige Smart Grids und Industrienetze« auf dem Symposium Photovoltaische Solarenergie vom 8. – 10. März 2017, Bad Staffelstein

**Robin White** | »Young Researcher Award 2017« der Global Green Chemistry Centres (G2C2)

**Monika Bosilj** | Posterpreis für »Hydrothermal Carbons & their Derivatives in Heterogeneous Catalysis« auf der 1. International Conference on Hydrothermal Carbonisation, 3. – 4. April 2017, London, Großbritannien

**Wolfram Kwapil** | SiliconPV Award für »Kinetics of Carrier-Induced Degradation at Elevated Temperature in Multicrystalline Silicon Solar Cells«, auf der 7. SiliconPV, 3. – 5. April 2017, Freiburg

**Armin Richter** | SiliconPV Award für »Silicon Solar Cells with Passivated Rear Contacts: Influence of Wafer Resistivity and Thickness«, auf der 7. SiliconPV, 3. – 5. April 2017, Freiburg

**Jens Ohlmann** | Best Poster Award für »35.1 % Efficient GaInP/GaInAs Dual-Junction Solar Cells Optimized for Direct Hydrogen Generation« am 26. Juni 2017 auf der 44<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA

**Romain Cariou** | Best Poster Award für »Wafer Bonded III-V on Silicon Multi-Junction Cell with Efficiency beyond 31 %« am 29. Juni 2017 auf der 44<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA

**Sven Killinger** | Best Student Poster Award für »Evaluating Different Upscaling Approaches to Derive the Actual Power of Distributed PV Systems« am 29. Juni 2017 auf der 44<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Washington DC, USA

**Anne-Christine Scherzer** | Posterpreis für »Spatially Resolved Analysis of the Characteristic Time Constant of the Low-Frequency Arc in Electrochemical Impedance Spectra of PEMFC« auf dem »647. WE-Heraeus-Seminar on Next Generation PEM Fuel Cells«, 2. – 5. Juli 2017, Bad Honnef

**Jakob Hömberg** | Dr. Tyczka-Energiepreis für die Masterarbeit »Lifecycle Assessment of Methanol Production Based on Renewable Hydrogen and Recycled Carbon Dioxide (Power-to-Methanol)« am 14. September 2017, Geretsried

**Katharina Gensowski** | EU PVSEC Poster Award für »Development for Electrochemical Screen Printing to Structure Metal Layers of Back Contact Solar Cells« auf der 33<sup>rd</sup> EU PVSEC, 25. – 29. September 2017, Amsterdam, Niederlande

**Rok Kimovec** | EU PVSEC Student Award für das Gemeinschaftspaper »Multi-segment Photovoltaic Laser Power Converters and their Electrical Losses«, auf der 33<sup>rd</sup> EU PVSEC, 25. – 29. September 2017, Amsterdam, Niederlande

**Sven Killinger, Nicholas Engerer, Björn Müller** | Preis »Best Paper in Solar Resources / Meteorology« der Zeitschrift »Solar Energy« für das Gemeinschaftspaper »QCPV: A Quality Control Algorithm for Distributed Photovoltaic Array Power Output« auf dem ISES Solar World Congress 2017, 29. Oktober – 2. November 2017 Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate

**Thibault Pflug** | Kepler-Preis der Stiftung Saint-Thomas für seine Dissertation »Development, Characterization and Evaluation of Switchable Façade Elements«, November 2017, INSA Straßburg, Frankreich

**Mohamed Ouda, Christoph Hank** | Posterpreis für »Using Renewable Energy for Thermochemical Catalytic Synthesis of Sustainable Designer Fuels« beim Ideenwettbewerb »Meine Stadt von morgen« der Stiftung Energie & Klimaschutz BW, November 2017

# NACHHALTIGKEIT



[www.ise.fraunhofer.de/de/ueber-uns/nachhaltigkeit](http://www.ise.fraunhofer.de/de/ueber-uns/nachhaltigkeit)

Die Entwicklung von Lösungsansätzen und Entscheidungsgrundlagen für die besonders wichtigen gesellschaftlichen Herausforderungen ist ein wesentlicher Beitrag von Wissenschaft zu einer nachhaltigen Entwicklung. Das Fraunhofer ISE leistet mit einem großen Teil seiner Forschungs- und Entwicklungsarbeit einen Beitrag zum Erreichen der »Sustainable Development Goals« der Vereinten Nationen. Diese Entwicklungsziele der internationalen Nachhaltigkeitspolitik wurden von den Vereinten Nationen 2015 verabschiedet und sollen bis 2030 weltweit umgesetzt werden.

Der wesentliche Beitrag des Fraunhofer ISE liegt bei den wissenschaftlich-technologischen Entwicklungen in Entwicklungsziel 7 »Bezahlbare und saubere Energie«. Darüber hinaus haben wir im Rahmen unseres Forschungsportfolios sieben weitere Entwicklungsziele identifiziert, für die unsere Arbeit relevant ist.

Wie die Debatten um die Entwicklung der Energiewende in Deutschland zeigen, gewinnt an der Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft die Einbindung sämtlicher am Innovationsprozess beteiligten Akteure eine zunehmend wichtige Rolle. Unter dem Stichwort Partizipative Technologiegestaltung konnte z. B. im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt »APV-Resola« des Fraunhofer ISE die Innovationsplanung an den aktuellen gesellschaftlichen Bedürfnissen durch Einbeziehung von Bürgerwerkstätten ausgerichtet werden und so die Einbettung der APV-Systemtechnologie in die Gesellschaft erleichtert werden.

Gesellschaftliche Herausforderungen wie die Energiewende zeichnen sich aber neben der Vielfalt beteiligter Akteure auch durch eine hohe Komplexität, Vernetzung und offene Fragestellungen aus. Eine Kernkompetenz des Fraunhofer ISE liegt neben der Technologieentwicklung in der Überführung technischer Lösungen hin zu anwendungsorientierten Systeminnovationen. So erarbeiten wir innovative Lösungen für die Herausforderungen der Energiewende

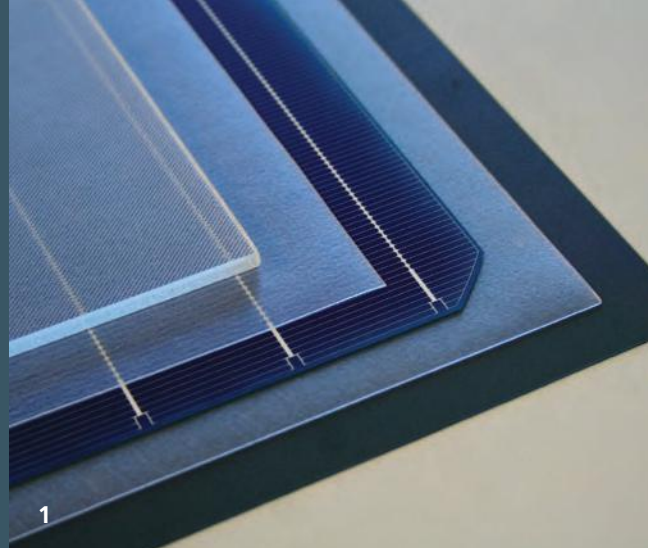


*Grafik: Beziehungen der »Sustainable Development Goals« der Vereinten Nationen zu den Themen des Fraunhofer ISE.*

vom Beginn der Ansätze in der Grundlagenforschung bis zur anwendungsorientierten Forschung und Marktintegration sowohl in disziplinärer Tiefe als auch interdisziplinär und systemübergreifend. Unsere Technologieentwicklungen und Dienstleistungen finden entsprechend in ganzheitlichen Energie-, Stadt- oder Mobilitätssystemen Anwendung. Neben unseren Forschungsbeiträgen für eine nachhaltige Energieversorgung verfolgen wir das Ziel, unsere soziale und ökologische Verantwortung auch in unseren Organisationsprozessen zu integrieren und unsere gesellschaftliche Verantwortung im Sinne einer Corporate Responsibility weiter zu entwickeln.

Inhalte und Maßnahmen berichten wir im Rahmen unserer Nachhaltigkeitsberichterstattung nach Richtlinien der »Global Reporting Initiative«. Im Jahr 2017 hat das Fraunhofer ISE erstmalig eine Entsprechenserklärung zum Deutschen Nachhaltigkeitskodex abgegeben.

# PARTNER DER INDUSTRIE



Innovationen sind für unsere Wirtschaft ebenso wie für jedes einzelne Unternehmen die Basis des Erfolgs. Es bedarf aber einer entsprechenden, oftmals aufwendigen technischen Infrastruktur und der Erfahrung von Spezialisten, um neue Ideen in konkrete Verfahren und Produkte zu überführen, die schließlich am Markt erfolgreich sind. Dafür lohnen sich Forschungsk Kooperationen, die von neuesten Ergebnissen aus Wissenschaft und Forschung profitieren können.

Forschung im Auftrag der Kunden ist das primäre Geschäftsfeld aller Fraunhofer-Institute. Die intensive Kooperation mit der Industrie führt zu einer ständigen Anpassung der Fraunhofer-Forschung an die Anforderungen der Unternehmen. Darauf ausgerichtet sind Infrastruktur und Organisation der Institute. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter schöpfen ihr berufliches Selbstverständnis daraus, dass ihre Arbeit stets die konkrete Anwendung zum Ziel hat. Der Umgang mit vielen unterschiedlichen Auftraggebern sorgt zudem für umfassende Erfahrungen mit der Denk- und Arbeitsweise von Unternehmen und eröffnet Einblicke in unterschiedliche Unternehmenskulturen. Unternehmen achten darauf, ihre Innovationsarbeit so effektiv wie möglich zu gestalten. Dafür bieten Fraunhofer-Institute passgenaue Lösungen mit Auftragsforschung als günstige Möglichkeit an: Als Partner auf Zeit erledigen Fraunhofer-Institute konkrete Projekte termingerecht und professionell. Die Kosten sind im Vergleich zu unternehmensintern aufgebauter Forschungskapazität gering und gut kalkulierbar.

Auch für das Fraunhofer ISE stehen die Anforderungen der Kunden im Mittelpunkt. Das Institut unterstützt seine Projektpartner aus Wirtschaft und Forschung bei der Entwicklung von technologisch führenden Lösungen und deren Implementierung, mit dem Ziel die Wettbewerbsfähigkeit der Kunden zu steigern. Zugeschnitten auf den individuellen Bedarf und die spezifischen Fragestellungen, begleiten wir unsere Kunden von der ersten Idee bis zum marktreifen Produkt. Wichtige Eckpfeiler dafür sind garantierte Vertraulichkeit, erstklassige

Ausstattung, zuverlässiges Projektmanagement, zielorientiertes Arbeiten und professionelle Vereinbarungen hinsichtlich der Nutzungsrechte.

## Maßgeschneiderte Forschungsk Kooperationen

Unternehmen haben meist eine sehr konkrete Vorstellung davon, welche Aufgabe bis wann gelöst werden soll. Sie fragen oft direkt bei uns an oder es ergeben sich Kontakte bei Gesprächen im Rahmen von Veranstaltungen und Messen. Danach kommt es zu einem ersten kostenlosen und unverbindlichen Beratungsgespräch. Hier kann ausgelotet werden, welche Ziele bei der Kooperation erreicht werden sollen und wie der zeitliche und finanzielle Rahmen aussehen kann. Mit der Unterzeichnung der Verträge beginnt die Forschungs- und Entwicklungsarbeit. Für einige Auftraggeber ist auch von Bedeutung, dass das Fraunhofer ISE an Verbundprojekten beteiligt ist, die auch vom Staat oder von der EU unterstützt werden. Im Rahmen eines Beratungsgesprächs können konkrete Möglichkeiten der Zusammenarbeit in solchen Projekten ausgelotet werden.

Das Fraunhofer ISE richtet sich grundsätzlich nach dem spezifischen Bedarf des Kunden. Das Unternehmen will etwa eine Produktinnovation auf den Markt bringen, ein Verfahren verbessern oder einen Prozess prüfen lassen. Kleine, sehr konkrete Projekte werden ebenso bearbeitet wie Großprojekte über mehrere Jahre. Kunden des Fraunhofer ISE sind Unternehmen verschiedener Branchen und Größen, vom kleinen und mittelständischen Unternehmen bis zum Weltkonzern.

## Erprobte Rahmenbedingungen

Wir achten dabei streng auf den Schutz der Daten und vertraulichen Informationen unserer Auftraggeber. Bei Bedarf werden zur Wahrung der Vertraulichkeit separate Räumlichkeiten oder abgetrennte Laborbereiche eingerichtet. In manchen Fällen kooperieren Wettbewerber ganz bewusst mit uns, da hier ein unabhängiges, vorwettbewerbliches Umfeld entsteht, in dem Synergien genutzt werden können.



Der Auftraggeber erhält das Eigentum an Produkten, Prototypen und sonstigen materiellen Gegenständen, die in seinem Auftrag entwickelt wurden. Darüber hinaus bekommt er die notwendigen Nutzungsrechte an den von uns dabei geschaffenen Erfindungen, Schutzrechten und entstehendem Know-how. Durch die anwendungsbezogene Nutzungsberechtigung erhält der Kunde optimalen Konkurrenzschutz.

Manche Problemstellungen sind so komplex, dass mehrere Partner die Lösung entwickeln müssen. Dann steht den Auftraggebern das gesamte Umfeld der Fraunhofer-Institute zur Verfügung. Auch externe Partner und weitere Unternehmen können hinzugezogen werden. Fraunhofer-Forscher haben Erfahrung mit der effizienten und fairen Abwicklung großer Projekte. Und sie wissen auch, welche staatlichen Förderungen dabei infrage kommen. Die Fraunhofer-Gesellschaft verfügt zudem über Auslandsvertretungen, und viele Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter haben internationale Erfahrung, entsprechende kulturelle und sprachliche Kompetenzen und kennen die weltweiten Märkte aus eigener Anschauung. So können international agierende Unternehmen auch im Ausland betreut werden.

### **Strategische Partnerschaften und Innovationscluster**

Um vielversprechende technologische Ansätze voranzutreiben, leistet das Fraunhofer ISE auch Vorlaufforschung. Diese Eigenforschungsprojekte sind zunächst unabhängig von konkreten Aufträgen. Das Institut sucht dafür gegebenenfalls strategische Partner oder Lizenznehmer, um erfolgversprechende Technologien weiter zu entwickeln und bei Unternehmen zum Einsatz zu bringen. Einige Entwicklungen werden auch in Form von Ausgründungen in den Markt transferiert.

Für sehr komplexe, kompetenzübergreifende Fragestellungen hat die Fraunhofer-Gesellschaft Innovationscluster und Leistungszentren ins Leben gerufen. Diese haben die Aufgabe, kompetente Partner einer Region zur Lösung anspruchsvoller Aufgaben zusammenzuführen und für den Erfahrungs-

austausch zu vernetzen. Neben Industrie und Hochschulen werden auch weitere dort ansässige außeruniversitäre Forschungsinstitute eingebunden, die für das entsprechende Themenfeld wichtige Beiträge leisten können. Ein Beispiel dafür ist das Leistungszentrum Nachhaltigkeit in Freiburg.

### **Kundenzufriedenheit sicherstellen**

Aufgrund unserer konsequenten Ausrichtung an den Forschungs- und Entwicklungsanliegen unserer Kunden sind uns die Zufriedenheit unserer Auftraggeber und die Qualitätssicherung unserer Projekte sehr wichtig. Das Fraunhofer ISE führt jährlich eine Kundenzufriedenheitsbefragung durch, deren gute Ergebnisse uns ein Ansporn für unsere Arbeit sind. Wir freuen uns auch über das hohe Maß an Wiederbeauftragungen und die dadurch entstehenden langjährigen, vertrauensvollen Kooperationen mit unseren Auftraggebern.

**1** *In verschiedenen Projekten erforscht das Fraunhofer ISE mit unterschiedlichen Industriepartnern verschiedene PV-Modul-Materialien und -Designs im Hinblick auf ihre Auswirkungen auf den Wirkungsgrad.*

**2** *Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbund-Forschungsprojekts »TABSOLAR« entwickelte das Fraunhofer ISE mit fünf Projektpartnern neuartige fluiddurchströmte Bauteile auf Basis von Ultrahochleistungsbeton (UHPC). ©G.tecz Engineering GmbH*

**3** *Das Fraunhofer ISE begleitet wissenschaftlich die Inbetriebnahme und den Betrieb des neuen Verwaltungszentrums der Stadt Freiburg. Ein Ziel des Projekts ist, von Planung und Ausschreibung über Bau und Inbetriebnahme bis zu einem fortlaufenden Energie-Monitoring, Werkzeuge zur integralen Planung und Erfolgskontrolle einzusetzen und weiterzuentwickeln. ©ingenhoven architects H.G. Esch*

# NEUE STRUKTUREN UND NEUE SCHWERPUNKTE

Frage: **Herr Henning, Herr Bett, dieser Jahresbericht ist auch ein Rückblick auf Ihr erstes Jahr als Institutsleiter – wenn wir zunächst die strukturellen Veränderungen in der Organisation des Instituts betrachten, was sind die wesentlichen Veränderungen und welches waren die Motive dafür?**

**Henning:** Die größte und sichtbarste Veränderung ist, dass wir das Institut jetzt in zwei Bereiche gegliedert haben, »Photovoltaik« sowie »Energietechnologien und -systeme«, was letztlich auch die Aufstellung der Institutsleitung mit zwei Institutsleitern widerspiegelt.

**Bett:** Die Doppelspitze war von uns vor allem auch gewünscht, um die große Themenbreite des Fraunhofer ISE auf der Leitungsebene besser abzubilden. Dabei steht Herr Henning eher für die systemischen Themen und ich für die Photovoltaik.

**Henning:** Ein Motiv für die neue Organisationsstruktur war der Wunsch, klarere interne Schnittstellen zu schaffen und inhaltliche Doppelungen zu vermeiden. Im Lauf der Jahre des Wachstums hatten sich Überschneidungen in den Profilen der Gruppen und Abteilungen entwickelt. Wir hatten im Bereich »Energietechnologien und -systeme« bereits 2016 mit der Umstrukturierung begonnen und in diesem Jahr haben wir die neu sortierten Abteilungen und Gruppen um die Führungsebene ergänzt. Zugleich liegt uns daran, eine neue Kultur der Zusammenarbeit zu fördern – eine wichtige Voraussetzung gerade für übergreifende, systemorientierte Projekte, in denen die große thematische Breite des Fraunhofer ISE zum Tragen kommen kann.

Frage: **Herr Bett, die Photovoltaik nimmt nach wie vor etwa die Hälfte der Aktivitäten des Instituts ein, ein strategischer Schwerpunkt, der den weltweit boomenden Markt widerspiegelt? In Deutschland und Europa gibt es ja kaum noch Fertigung?**

**Bett:** Das Thema Photovoltaik ist nach wie vor ein sehr wichtiges Thema für das Fraunhofer ISE, da diese Technologie eine Hauptsäule einer nachhaltigen Energieversorgung darstellt. Die große Stärke des Fraunhofer ISE ist, dass wir mit unserer Forschung und Entwicklung die gesamte Wertschöpfungskette vom Material bis zur Systemintegration abbilden. Der Markt wächst weltweit, in diesem Jahr erwarten wir ein Marktvolumen von 100 Gigawatt, also erneut ein Plus von 25 Prozent, und unsere Kunden werden damit auch zunehmend international. In der Tat ist in Deutschland die Zell- und Modulherstellung ins Schleudern gekommen, aber es gibt eine ganze Reihe von führenden Firmen im Bereich Materialien und Maschinenbau, mit denen wir zusammenarbeiten. Dass die Photovoltaik künftig noch technologische Entwicklungen vor sich hat steht außer Frage. Mit der Grundsteinlegung für unser »Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen« stellen wir uns so auf, dass wir den Wirkungsgrad weiter steigern können, über die Grenze des Siliciummaterials hinweg.

Frage: **Können Sie das konkretisieren? Welche Entwicklungen sind hier möglich?**

**Bett:** Wir werden in der Zukunft auch Mehrfachsolarzellen auf Siliciumbasis auf dem Markt sehen. Dazu müssen die grundlegenden Entwicklungen jetzt angestoßen werden und kein Institut eignet sich dafür besser als das Fraunhofer ISE, weil wir eine lange Tradition beim Silicium haben, aber auch bei den III-V-Mehrfachzellen. Auch Mehrfachzellen aus Silicium und Perowskiten spielen dabei eine Rolle. Aber natürlich haben wir auch weiterhin den Schwerpunkt, die in jüngster Zeit erzielten Rekordwirkungsgrade für Solarzellen aus dem Labor in industrielle Produkte zu überführen. Dazu dient unser PV-TEC, das wir nach dem unglücklichen Brandfall mit Nachdruck wieder aufbauen, um es unseren Industriekunden wieder zu Verfügung zu stellen. Mit der Kostenreduzierung für Solarstrom sind wir schon sehr weit gekommen, ein neuer Aspekt wird dann aber auch die ökologische Betrachtung der Produktionsprozesse sein, hier sei das Stichwort Recycling genannt.



**Henning:** Wir müssen uns vor Augen führen, wie viel erneuerbaren Strom wir für die Umsetzung einer nachhaltigen Energieversorgung brauchen werden. Dabei ist die Photovoltaik die einzige Technologie, die in bebauten Strukturen und am Ort des Verbrauchs eingesetzt werden kann. Dies ist eine Chance, aber auch eine Herausforderung. Photovoltaik wird ein Teil der städtischen Infrastruktur werden und auch hierfür ist das Fraunhofer ISE bestens aufgestellt, von den Materialien und der Modulentwicklung bis hin zur baulichen und systemischen Integration in Gebäude und Quartiere.

Frage: **Herr Henning, das am Fraunhofer ISE entwickelte Rechenmodell »REMod« liegt auch einem Papier der Wissenschaftsakademien unter Federführung der acatech zugrunde. Sie sind einer der Hauptautoren dieser Studie zur Sektorkopplung – was bedeutet die Sektorkopplung?**

**Henning:** Wir sprechen heute vielfach von der zweiten Phase der Energiewende. Damit ist einerseits die Sektorkopplung gemeint, also die Nutzung erneuerbarer Energien außerhalb des Stromsektors in heute noch fossil geprägten Sektoren. Bei der Wärmeversorgung von Gebäuden dominieren nach wie vor Heizöl und Erdgas. Ähnlich sieht es mit der Prozesswärme in der Industrie aus und auch im Verkehr sind fossile Kraftstoffe heute bestimmend. All diese Sektoren werden stärker elektrifiziert werden – sei es durch direkte Stromnutzung oder durch die Nutzung synthetischer Energieträger wie Wasserstoff, die mit erneuerbarem Strom hergestellt werden. Und der zweite, damit verknüpfte, wichtige Aspekt ist eine viel stärkere Systemintegration der erneuerbaren Energien.

Frage: **Was kann das Fraunhofer ISE zu der zweiten Phase der Energiewende beitragen und wo liegen in diesem Kontext die strategischen Schwerpunkte des Instituts?**

**Henning:** Viele Arbeitsfelder des Instituts können hier wichtige Beiträge liefern. Beispiel Gebäudeenergie-technik: es wird jetzt darauf ankommen, neben der Energieeffizienz der

Gebäude dort verstärkt erneuerbare Energien einzubringen – ein Grund, warum wir in den vergangenen fünf Jahren unsere Arbeiten zu Wärmepumpen stark ausgebaut haben. Daneben werden Speichertechniken immer wichtiger, ein Grund für uns, uns noch stärker um das Thema Batteriespeicher zu kümmern und jetzt auch die Batteriezellfertigung zu betrachten. Bei der Systemintegration spielt die Leistungselektronik eine zentrale Rolle, ein weiterer technologischer Schwerpunkt, der am Fraunhofer ISE einen Ausbau erfährt. Ebenso sind wir überzeugt, dass die Wasserstofftechnologie in den kommenden Jahren und Jahrzehnten eine Schlüsselrolle spielen wird, wenn es darum geht, erneuerbaren Strom in chemische Energieträger zu wandeln, die peu à peu fossile Brennstoffe z. B. in den Bereichen Schwerlast-, Schiffs- und Luftverkehr ersetzen. Aber auch solarthermische Kraftwerke, die derzeit eine starke Kostensenkung erleben und die wegen der integrierten thermischen Speicher eine bedarfsgerechte Energiebereitstellung ermöglichen, behält das Institut weiter im Blick.

Frage: **Herr Henning, Sie sind zugleich Sprecher der Fraunhofer Allianz Energie – wie sehen Sie die Stellung der Energiethemen innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft?**

**Henning:** Die Institute der Fraunhofer-Gesellschaft verfügen über ein breites Spektrum an Themen insbesondere bei den Schwerpunkten Energieeffizienz und erneuerbare Energien und sind an vielen Stellen in Deutschland, aber auch international führend. Allerdings kann man meines Erachtens die Kompetenzen noch stärker zusammenführen, um Fraunhofer als erste Adresse für angewandte Energieforschung sichtbar zu machen. Dies ist ein wichtiges Ziel, das ich mir für meine Rolle als Sprecher der Fraunhofer Allianz Energie vorgenommen habe und in enger Abstimmung und Zusammenarbeit mit dem Vorstand und der Zentrale der Fraunhofer-Gesellschaft umsetzen möchte.

1 Die Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning (links) und Dr. Andreas Bett (rechts).

# BATTERIEFORSCHUNG – ZUKÜNFTIGE AUSRICHTUNG UND PROJEKTBEISPIELE

## Batterietechnologien von herausragender Bedeutung

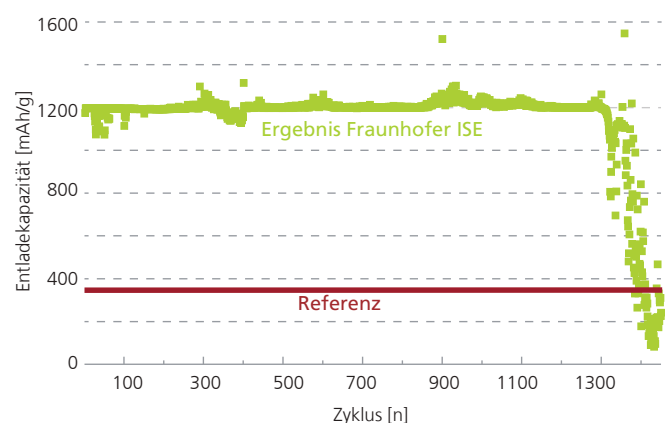
Wieder aufladbare Batterien entwickeln sich zu einer Schlüsseltechnologie des 21. Jahrhunderts. Für stationäre, besonders aber für mobile Anwendungen gewinnt die Speicherung elektrischer Energie eine herausragende Bedeutung, die zunehmend alle Lebensbereiche moderner Gesellschaften erfasst. Vor diesem Hintergrund erlangt die Beherrschung und Sicherstellung der Verfügbarkeit aller Stufen der Wertschöpfung für die Fertigung von Batteriesystemen und deren Komponenten eine wesentliche Bedeutung.

Das Fraunhofer ISE forscht seit vielen Jahrzehnten intensiv an Batteriesystemen. Schwerpunkte unserer Aktivitäten sind besonders die Wertschöpfungsstufen von Zellcharakterisierung und Moduldesign über Ladeelektronik und Batteriemangement bis hin zur Einbindung und optimiertem Betrieb im Gesamtsystem. In den vergangenen Jahren haben wir unsere Prüfmöglichkeiten zur energetischen Performance – Effizienz und Effektivität – von Batteriespeichern sowie zu dezidierten Alterungsuntersuchungen und Post Mortem Analysen erheblich ausgebaut. Herstellern und Anwendern von Batterien bieten wir Beratung, Entwicklung und Prüfung nach den gängigen Normen und Sicherheitsanforderungen sowie nach kundenspezifischen Testprotokollen. Hier planen wir einen weiteren Ausbau unserer Angebote in Richtung Zertifizierung nach gängigen Prüfverfahren und Richtlinien bis hin zu Gesamtsystemen. Dabei können wir hausinterne Kooperationen sowohl zum Geschäftsfeldthema Photovoltaische Kraftwerke als auch zu unseren breit aufgestellten Aktivitäten im Bereich der Leistungselektronik nutzen – ein ganz wesentlicher Gesichtspunkt, wenn es um Photovoltaik- oder Windkraftwerke in Verbindung mit Batteriespeichern und deren Netzeinbindung geht.

Im Ergebnis eines umfänglichen Strategieprozesses haben wir uns entschieden, unsere FuE-Arbeiten auch auf die Zellebene auszudehnen. Bei der Entwicklung von neuartigen Batterie-

zellen sowie der Überführung von Laborzellen in industriennahe Prozesse kann das Fraunhofer ISE auf seine langjährigen, umfassenden, erfolgreichen Erfahrungen in der Photovoltaik, aber auch bei optisch funktionalen Schichten aufbauen. Dies umfasst Material- und Technologiekenntnisse sowie ein tiefes Verständnis der relevanten Herstellprozesse einschließlich detaillierter Kostenanalysen.

Ein erster Schwerpunkt unserer neu begonnenen Arbeiten knüpft an die hervorragenden Kenntnisse des Werkstoffs Silicium an, die sich aus den viele Jahrzehnte umfassenden Forschungsarbeiten an Siliciumsolarzellen ergeben. So konnten wir Ergebnisse an einer Lithium-Ionen Halbzelle mit Silicium-Anode demonstrieren, bei der eine im Vergleich zu einer Standardelektrode mehr als 3fach höhere Entladekapazität über mehr als 1200 Zyklen stabil erreicht wurde (s. Grafik). Ein weiterer Schwerpunkt wird an der Schnittstelle des Transfers neuer Zellkonzepte in die industrielle Fertigung liegen – ebenfalls eine Fragestellung, bei der wir ganz wesentlich von dem entsprechenden Photovoltaik-Wissen profitieren.



*Grafik: Entladekapazität einer am Fraunhofer ISE entwickelten Si-Anode mit 1200 mAh/g Kapazität bei Zyklierung im Vergleich zu einer Referenzanode auf Basis Graphit (rund 350 mAh/g).*





## Projektbeispiele aus der Batterieforschung

### Silicium-basierte Anoden für leistungsfähige Lithium-Ionen Batterien

Silicium ist eines der aussichtsreichsten Materialien für die Anode der nächsten Generation von leistungsfähigen kompakten Lithium-Ionen Batteriezellen. Silicium kann deutlich mehr Lithium-Ionen als Graphit speichern und erlaubt theoretisch eine um fast eine Größenordnung höhere spezifische Kapazität der Anode. Allerdings haben Batteriezellen mit Silicium-basierten Anoden bislang nur sehr geringe Zyklenfestigkeiten. Auf Grundlage unseres spezifischen Know-hows zu Silicium konnten wir bereits äußerst vielversprechende Ergebnisse bei der Entwicklung von Silicium-basierten Anoden erzielen. In einem neuartigen Prozess haben wir Siliciumpartikel mit einer dünnen Kohlenstoffschicht ummantelt, die eine höhere Stabilität der Zelle verspricht. In ersten Experimenten konnte gezeigt werden, dass die auf diesen neuartigen Siliciummaterialien basierten Anoden bereits hohe Zyklenfestigkeiten aufweisen und zugleich sehr hohe Mengen an Lithium einspeichern können.

### Sicherheitsanforderungen an Batterien

Gegenüber herkömmlichen Technologien wie Blei- und NiMH Batterien haben Lithium-Ionen Batterien eine deutlich höhere Speicherdichte. Zudem haben sie auch ein deutlich höheres Gefährdungspotenzial, wenn sie beschädigt sind oder die zulässigen Betriebsbedingungen nicht eingehalten werden. Das Fraunhofer ISE hat aus den Themenbereichen netzgekoppelte und autarke PV-Anlagen viel Erfahrung mit dem Berührungs- und Kurzschlusschutz und überträgt diese Kenntnisse auf den Betrieb von Batteriesystemen. Um das Gefahrenpotenzial von Lithium-Ionen Batterien zu beherrschen, entwickeln wir darüber hinaus in verschiedenen Vorhaben – u. a. mit Förderung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) – verbesserte Batteriemangementsysteme, die der Vermeidung von kritischen Betriebszuständen dienen und zugleich die Lebensdauer der Batterien erhöhen.

Dr. Daniel Biro | Telefon +49 761 4588-5246

Dr. Matthias Vetter | Telefon +49 761 4588-5600

### Batterien für die Elektromobilität

Fahrzeugg Batterien sind die größte technologische Herausforderung für die Elektromobilität. Sie müssen leistungsfähig, sicher und zuverlässig sein und eine große Reichweite gewährleisten. Große Temperaturunterschwankungen und hohe Belastung beim Schnellladen stellen hohe Anforderungen an das thermische Management. Am Fraunhofer ISE haben wir einen systematischen Prozess entwickelt, um zusammen mit unseren Kunden die für die jeweilige Applikation optimalen Lithium-Zellen auszuwählen. Dies beinhaltet die elektrische und thermische Charakterisierung von Zellen jeglicher Größe ebenso wie die Ermittlung der kalendarischen und zyklischen Alterung durch Erfassung der Änderung von Zellparametern über die Lebensdauer.

Im EU-geförderten Projekt »MARS-EV« konnten wir mithilfe stochastischer Filtersysteme zeigen, dass der Alterungs- und der Ladezustand der Fahrzeugbatterien jederzeit in situ präzise ermittelbar sind. Auf der Grundlage dieser Arbeiten werden thermisch und elektrisch gekoppelte Modelle sowie Betriebsführungsstrategien für das Energiemanagement entwickelt. Im EU-geförderten Projekt »JOSPEL« konnten wir demonstrieren, dass durch die optimierte Betriebsführung der verwendeten Lithium-Ionen Batterien eine Energieeinsparung von über 12 % bei einer gleichzeitigen Lebenszeitverlängerung von 15 % erreichbar sind.

1 Untersuchung von Lithium-Ionen Batterien in einer Glovebox.

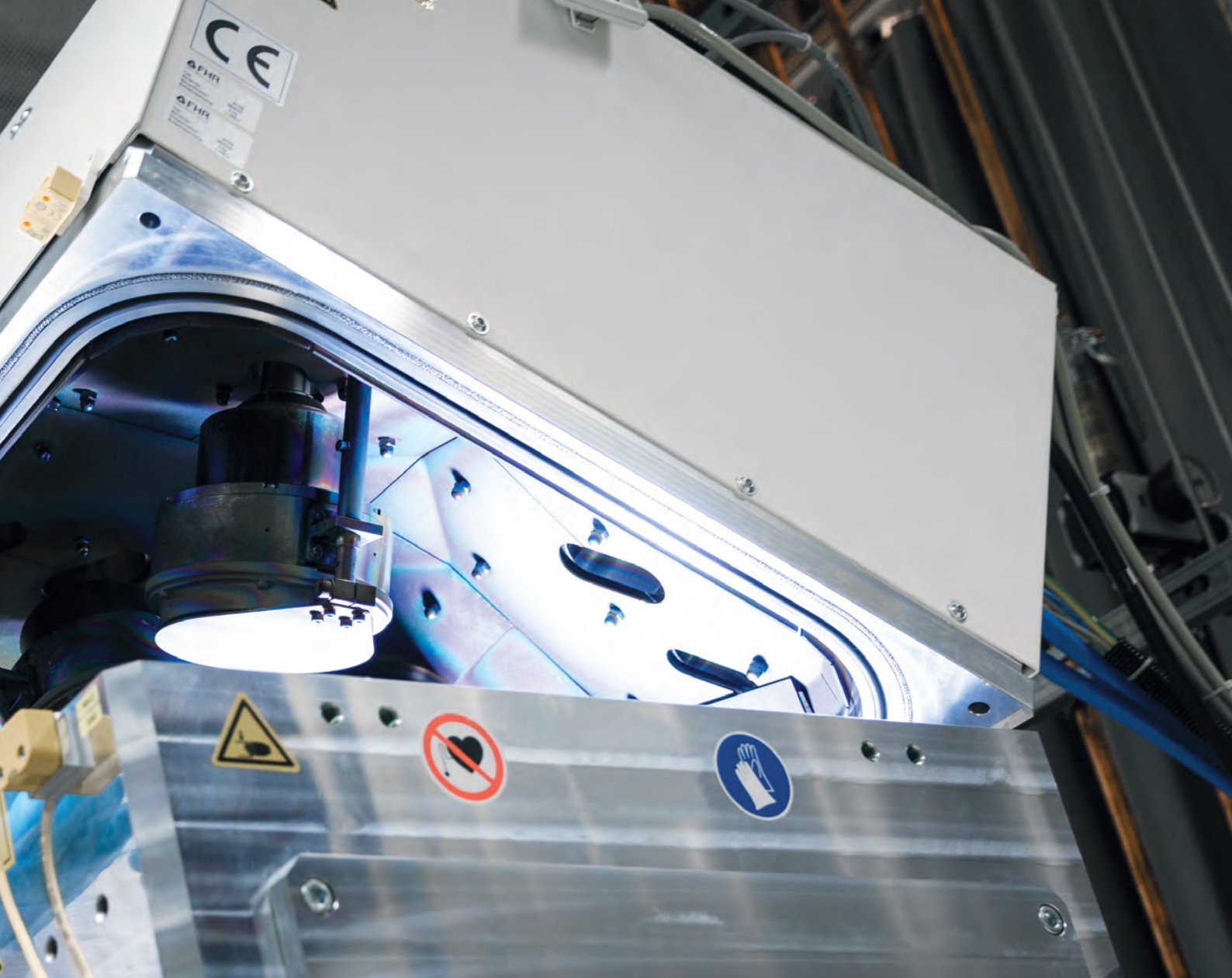


# PHOTOVOLTAIK

Auf der Klimakonferenz in Paris 2015 hat sich die Weltgemeinschaft darauf verständigt, die Erwärmung unserer Atmosphäre auf maximal 1,5 °C zu begrenzen und so eine globale Energiewende umzusetzen. Photovoltaik ist für eine ökonomisch und ökologisch realisierbare Energieversorgung eine zentrale Säule. In den letzten zehn Jahren sind die Modulpreise von ca. 2,70 €/W auf ca. 0,40 €/W gefallen. Dadurch können heute in Deutschland konkurrenzfähige Stromgestehungskosten von unter 5 €cent/kWh erreicht werden. Entsprechend wächst auch der globale Photovoltaikmarkt mit hohen Wachstumsraten. 2016 betrug die Steigerung über 30 % und kumuliert wurde bis Ende 2016 ein Drittel eines Terawatts an Photovoltaikleistung global installiert. Die Photovoltaik boomt und wird weiter rasant wachsen!

Forschung und Entwicklung haben zu dieser Erfolgsgeschichte ganz wesentlich beigetragen. Das Fraunhofer ISE kann auch dieses Jahr hervorragende FuE-Ergebnisse präsentieren. Besonders stolz sind wir auf die erzielten, verbesserten Wirkungsgrade für mono- und multikristalline Siliciumsolarzellen. Dabei spielt die am Fraunhofer ISE entwickelte Technologie zur Passivierung der Kontakte (Tunnel Oxide Passivated Contact – TOPCon) eine besondere Rolle. Gutes Siliciummaterial ist die Grundlage für hohe Solarzellenwirkungsgrade. So haben wir ein spezielles High Performance Silicium entwickelt, das als Basismaterial für unsere multikristalline Solarzelle mit einem Rekordwirkungsgrad von 22,3 % eingesetzt wurde. Auch bei der monokristallinen Materialentwicklung am Center für Siliziumphotovoltaik (CSP) am Standort Halle konnten

**i** Sputteranlage zur Abscheidung von Antireflexschichten und Metallkontakten.



große Fortschritte erzielt werden. Unsere FuE-Arbeiten im Themenfeld Wafering führen wir am Technologiezentrum für Halbleitermaterialien (THM) am Standort Freiberg durch. Die Vorlaufforschung des Fraunhofer ISE wird in unserem PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center industriell umgesetzt. Zuletzt hatten wir dort einen Basisprozess für monokristalline Si-PERC-Solarzellen mit einem stabilen mittleren Wirkungsgrad von 21 % etabliert. Ende Februar 2017 zerstörte ein Brand das Hauptgebäude des PV-TEC. Glücklicherweise konnten die geplanten FuE-Arbeiten größtenteils in anderen Labors weitergeführt werden. Der Wiederaufbau des PV-TEC ist bereits in vollem Gang, und wir sind zuversichtlich, dass es im Frühjahr/Sommer 2018 wieder voll funktionstüchtig ist.

Das Fraunhofer ISE hat zudem Verfahren zur präzisen Charakterisierung und Ertragsanalyse besonders von bifazialen Zellen und Modulen erfolgreich weiterentwickelt. Unser akkreditiertes CalLab PV Modules konnte eine weltweit führende Messunsicherheit von nur 1,3 % erreichen. Spitzenwirkungsgrade

von bis zu 46,1 % haben wir mit Mehrfachsolarzellen auf Basis der III-V-Halbleiter und in Kombination mit der optischen Konzentratortechnologie erzielt. Unsere langjährigen Erfahrungen mit der Herstellung von Mehrfachsolarzellen konnten wir nutzen, um eine monolithische Mehrfachsolarzelle aus GaInP/GaAs//Si mit einem Wirkungsgrad von 33,3 % herzustellen. Diese Technologie ist zukunftsweisend und zeigt, wie das begrenzende Auger-Limit von 29,4 % bei Einfach solarzellen aus Silicium überwunden werden kann. Auch unsere Arbeiten an Organischen und Perowskitesolarzellen eröffnen interessante Perspektiven und Anwendungsmöglichkeiten.

Mit unserem Portfolio sind wir für die Zukunft gut aufgestellt und tragen dazu bei, die Photovoltaik noch effizienter zu machen – in Bezug auf Energieertrag, aber auch in Bezug auf Produktionsverfahren und Materialeinsatz. Eine kostengünstige und gleichzeitig nachhaltige Prozesskette entlang der gesamten Wertschöpfungskette ist unser ambitioniertes Ziel.

# SILICIUM-PHOTOVOLTAIK

1

Über 90 % aller Solarzellen weltweit werden aus kristallinem Silicium hergestellt. Schlüssel für diese dominierende Marktstellung sind zum einen ein robuster und kostengünstiger Herstellungsprozess und zum anderen der hohe Wirkungsgrad und die große Zuverlässigkeit von siliciumbasierten PV-Modulen. Gerade der Wirkungsgrad spielt für die weitere Kostensenkung der Stromgestehungskosten eine entscheidende Rolle und steht deshalb im Mittelpunkt der Forschungsaktivitäten.



**328**

Mitarbeitende

Das Fraunhofer ISE unterstützt die Forschung und Entwicklung von Material-, Modul- und Anlagenherstellern durch eine weltweit einzigartige FuE-Infrastruktur mit über 3000 m<sup>2</sup> Labor- und Technikumsfläche. Die wissenschaftliche und technologische Kompetenz unserer über 300 Wissenschaftler, Ingenieure und Techniker reicht dabei vom Siliciummaterial über Solarzelle und Modul bis zum System. So können unsere Kooperationspartner nicht nur auf einzelne Technologien zugreifen, sondern über die gesamte Wertschöpfungskette mit uns zusammenarbeiten.



**67**

Zeitschriften- und Buchbeiträge

Der Technologiereifegrad unserer Projekte umfasst die gesamte Bandbreite von der Laborforschung bis zur industrienahen Entwicklung. Mit neuen Technologien und Weltrekordwirkungsgraden aus unseren Forschungslabors setzen wir immer wieder wissenschaftliche Trends in der Photovoltaik und geben so wichtige Impulse für Neuentwicklungen. In unseren Technologiezentren PV-TEC und SiM-TEC mit ihrer industrienahen Infrastruktur können wir reifere Konzepte unter realistischen Bedingungen evaluieren sowie innovative und industrienaher Fertigungsprozesse entwickeln. Neben der topaktuellen Technologie ist eine tiefgehende Charakterisierung der zugrundeliegenden Prozesse und eine sorgfältige Qualitätssicherung über die gesamte Wertschöpfungskette für unsere Kunden und Kooperationspartner von großer Bedeutung.



**51**

Vorträge und Konferenzbeiträge



**14**

Neu erteilte Patente

1 Die multikristalline Weltrekordsolarzelle aus n-Typ HPM

Siliciummaterial hat eine Fläche von 2 cm x 2 cm. Die Zelle ist sehr gut entspiegelt, daher sind kaum noch Korngrenzen des Siliciummaterials zu erkennen und sie erscheint nahezu schwarz.

## Meilensteine 2017

- » 22,3 % Weltrekordwirkungsgrad für Solarzellen aus multikristallinem Silicium.
- » Mit 25,8 % Wirkungsgrad beste Siliciumsolarzelle mit beidseitiger Kontaktierung.
- » Grundsteinlegung für das Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen, das neueste Laborinfrastruktur bieten wird.
- » 21,5 % Wirkungsgrad für industrielle PERC-Solarzellen erreicht.
- » Erste bifaziale Schindelsolarzellen mit einem Wirkungsgrad von 20 %.



## Ansprechpartner

### Koordination Geschäftsfeldthema

Prof. Dr. Stefan Glunz, Dr. Ralf Preu  
Telefon +49 761 4588-0 | [sipv@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv@ise.fraunhofer.de)

### Feedstock, Kristallisation und Wafering

Dr. Stephan Riepe | Telefon +49 761 4588-5636  
[sipv.material@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.material@ise.fraunhofer.de)

### Epitaxie, Si-Folien und SiC-Abscheidungen

Dr. Stefan Janz | Telefon +49 761 4588-5261  
[sipv.csi-thinfilm@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.csi-thinfilm@ise.fraunhofer.de)

### Charakterisierung von Prozess- und Silicium-Materialien

Dr. Martin Schubert | Telefon +49 761 4588-5660  
[sipv.characterization@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.characterization@ise.fraunhofer.de)

### Dotierung und Diffusion

Dr. Jan Benick | Telefon +49 761 4588-5020  
[sipv.doping@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.doping@ise.fraunhofer.de)

### Oberflächen: Konditionierung, Passivierung, Lichteinfang

Dr. Jochen Rentsch | Telefon +49 761 4588-5199  
[sipv.surface@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.surface@ise.fraunhofer.de)

### Kontaktierung und Strukturierung

Dr. Markus Glatthaar | Telefon +49 761 4588-5918  
[sipv.contact@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.contact@ise.fraunhofer.de)

### Herstellung und Analyse von hocheffizienten Solarzellen

Dr. Martin Hermle | Telefon +49 761 4588-5265  
[sipv.hieta@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.hieta@ise.fraunhofer.de)

### Pilotherstellung von industrienahen Solarzellen

Dr. Ralf Preu | Telefon +49 761 4588-5260  
[sipv.pilot@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.pilot@ise.fraunhofer.de)

### Messtechnik und Produktionskontrolle

Dr. Stefan Rein | Telefon +49 761 4588-5271  
[sipv.metrology@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.metrology@ise.fraunhofer.de)


### Dünnschicht-Siliciumsolarzellen


Dr. Dietmar Borchert | Telefon +49 209 15539-13  
[sipv.si-thinfilm@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.si-thinfilm@ise.fraunhofer.de)

### Technologiebewertung


Dr. Ralf Preu | Telefon +49 761 4588-5260  
[sipv.assessment@ise.fraunhofer.de](mailto:sipv.assessment@ise.fraunhofer.de)

## Ausgewählte Projekte 2017

 CUT-A – Cutting Edge Charakterisierung und Technologie für die deutsche PV-Industrie, Projektteil A

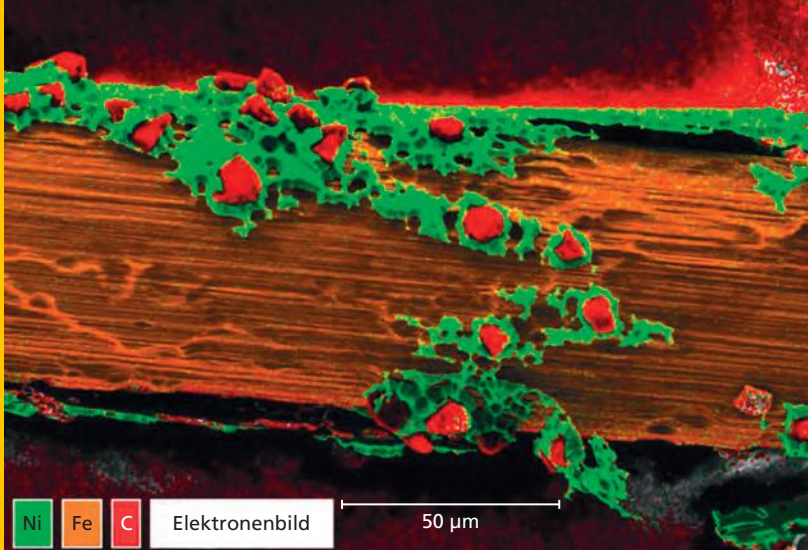
 Rock-Star – Evaluation und Entwicklung von Rotationsdruckverfahren für die Herstellung von Si-Solarzellen

 Nano-Tandem – Tandemsolarzellen auf der Basis von Nanodrähten

 SiTaSol – Anwendungsrelevante Validierung von c-Si basierten Tandemsolarzellenprozessen mit 30 % Zielwirkungsgrad

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten:  
[www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-01](http://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-01)





1

## Diamantdrahtgesägtes High Performance multikristallines Silicium

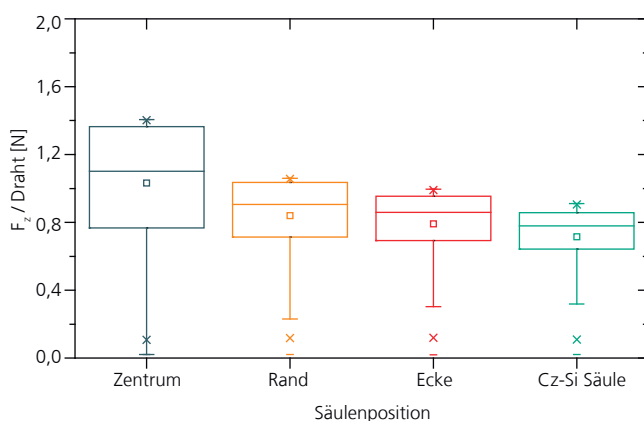
Dr. Thomas Kaden | Telefon +49 3731 2033-166 | sipv.material@ise.fraunhofer.de

High Performance multikristallines Silicium (HP mc-Si) zeichnet sich durch eine geringere Anzahl von Versetzungen und damit eine höhere Materialqualität als herkömmliches mc-Si aus. Daher ist davon auszugehen, dass HP mc-Si das Standardmaterial in den nächsten Jahren vollständig ablösen wird. Das hohe Wirkungsgradpotenzial wurde auf n-dotiertem Material mit einem Weltrekord-Wirkungsgrad von 22,3 % nachgewiesen.

Um die Kosten bei der Produktion von mc-Si-Solarzellen weiter zu senken, ist es nötig, den Drahtsägeschritt vom etablierten Slurry-Verfahren auf die Diamantdrahtsägetechnologie zu überführen. Durch die Verwendung von Wasser als Kühlschmierstoff und durch höhere Vorschubgeschwindigkeiten ist

dieses Verfahren kosteneffizienter. Während für monokristallines Silicium dieser Wandel bereits in großen Teilen vollzogen ist, besteht bei mc-Si noch mehr Entwicklungsbedarf. Das betrifft sowohl die Weiterentwicklung der Sägeprozesse als auch der Diamantdrähte und die anschließende Texturierung der Wafer.

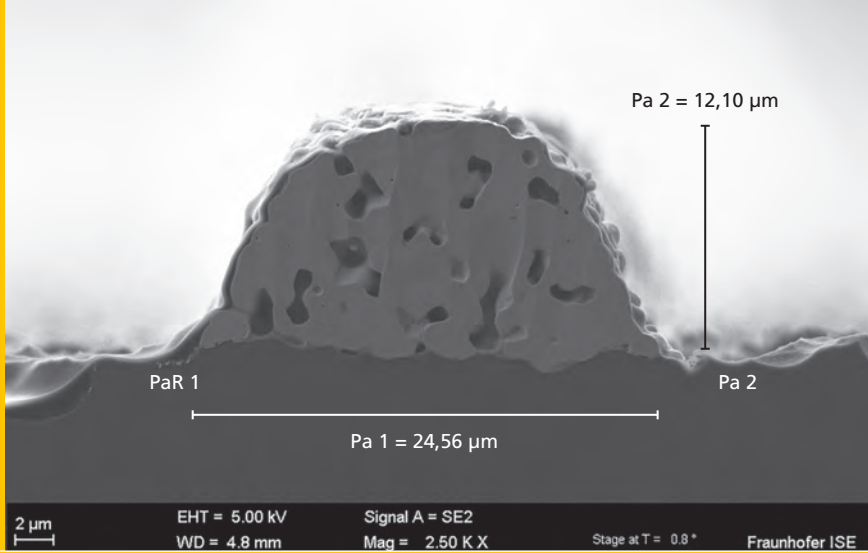
Mit gezielten Diamantdrahtsägeprozessen hat das Fraunhofer THM zu einem grundlegenden Verständnis der Materialeigenschaften beigetragen, die sich auf die Schneideffizienz auswirken. So wurde ein signifikanter Unterschied in der Schneideffizienz von HP mc-Si-Säulen in Abhängigkeit von der Position im Ingot gefunden. Säulen aus dem Rand- und Eckbereich ließen sich deutlich einfacher schneiden als Säulen aus dem Zentrum des Ingots, wie durch die Kraft in Vorschubrichtung  $F_z$  während des Sägeprozesses gezeigt werden kann (s. Grafik). Je geringer  $F_z$ , desto besser ist die Schneideffizienz und umso geringer ist der Drahtverschleiß. Für die Rand- und Ecksäulen ist  $F_z$  nur 10–20 % größer im Vergleich zur Cz-Si-Referenzsäule.



Grafik: Kraft in Vorschubrichtung  $F_z$  für HP mc-Si-Säulen aus verschiedenen Positionen im Ingot; je größer  $F_z$ , desto geringer ist die Schneideffizienz.

Als Hauptursache für die niedrigere Schneideffizienz haben wir die Größe von Siliciumnitrid- und -carbidausscheidungen identifiziert. In den Säulen aus dem Zentrum sind deutlich größere Ausscheidungen vorhanden als in den Rand- und Ecksäulen, was sich jedoch für verschiedene Kristallisationsprozesse unterschiedlich darstellen kann. Damit kann der industrielle Diamantdrahtsägeprozess durch Vorsortierung der Säulen und Verwendung angepasster Vorschubgeschwindigkeiten und Drahtverbräuche optimiert werden. Die Charakterisierung der Drähte beinhaltet die Bestimmung der Diamantkorndichte auf dem Draht, die exakte Messung der Korngrößenverteilung vor und nach dem Prozess sowie die detaillierte Analyse der Kornform. Wir haben ein Verfahren entwickelt, das ein vollständiges Ablösen der Diamanten vom Draht ermöglicht und für eine prozessbezogene Analyse verwendet wird.

1 REM-EDX-Bild eines Diamantdrahts beim Abätzen der Diamanten und Nickelbeschichtung zur Analyse der Diamanten; Darstellung eines Zwischenschritts.



## Solarzellen-Produktionstechnologie – Dispensen von Metallkontakten

Dr. Maximilian Pospischil | Telefon +49 761 4588-5268 | sipv.contact@ise.fraunhofer.de

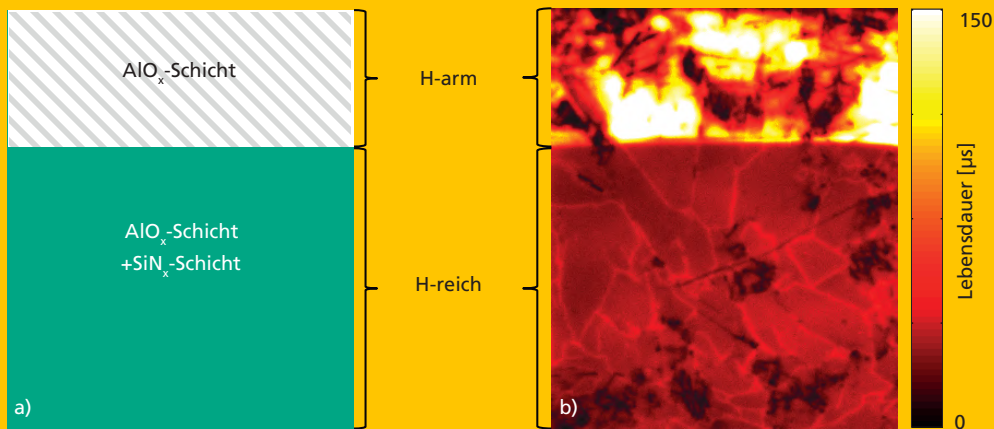
Ein zentraler Produktionsschritt bei der Herstellung von Siliciumsolarzellen ist die Aufbringung von Metallkontakten zur Stromentnahme auf Vorder- und Rückseite. Eine mögliche Alternative zum klassischen, seit Jahrzehnten dafür genutzten Siebdruckverfahren, ist das Dispensieren. Bei diesem bereits häufig u. a. in der Klebe- und Löttechnik eingesetzten Verfahren wird das zu dispensierende Medium durch eine dünne Dosiernadel gedrückt und in einem gewissen Abstand zum Werkstück aufgetragen. Dadurch kann sowohl die entstehende Fingergeometrie verbessert als auch die mechanische Belastung auf den Wafer während des Metallisierungsschritts deutlich reduziert werden.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Industrieprojekts »Gecko« konnte am Fraunhofer ISE zusammen mit den Partnern Heraeus, ASYS und Merck ein paralleles Dispensverfahren etabliert werden. Kernstück hierbei sind eigens entwickelte Dispensdruckköpfe, die anschließend in industriennahe Automatisierungsplattformen eingebaut werden können. In Zusammenarbeit mit der Firma ASYS wurden die zuvor entwickelten Prototypen mit zehn parallel angeordneten Düsen auf eine Version mit 16 cm Bearbeitungsbreite skaliert, wobei die Massenstromabweichung der 50 parallel angeordneten Düsen lediglich ca. 1 % beträgt. Mit diesem Druckkopf lassen sich Solarzellen bei Vorschubgeschwindigkeiten von bis zu 1 m/s kontaktlos bedrucken. Das ergibt ein erhebliches Durchsatzsteigerungspotenzial gegenüber herkömmlichen Flachbettsiebdruckanlagen.

Die äußerst homogenen Kontaktfinger ermöglichen es, den Silberpastenauftrag um ca. 15 wt.% gegenüber siebgedruckten Strukturen zu reduzieren – bei Verwendung derselben, kommerziell erhältlichen Siebdruckpaste. Gleichzeitig erhöhte sich der Wirkungsgrad der entsprechenden Solarzellen durch die nur 27 µm breiten Kontaktfinger um ca. 1 %<sub>rel.</sub> gegenüber siebgedruckten Referenzen. Ein derartiger Zuwachs konnte zuletzt beim Vergleich zweier Siebdruckpasten von verschiedenen Herstellern auf industrienahen Solarzellen festgestellt werden. Dort wurde ein Wirkungsgrad von 21,4 % erreicht. In einem weiteren Experiment haben wir eine Reduktion des Silberpastenverbrauchs (Nassauftrag) um 60 % auf nur noch 48 mg pro Wafer bei gleichbleibendem Wirkungsgrad (hier 21,2 %) erzielt. Hierbei entstanden nur noch 25 µm breite und 12 µm hohe Kontaktfinger.

Seit Juni 2017 wird im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Initiative »EXIST-Forschungstransfer« mit Hochdruck an der Kommerzialisierung der Technologie gearbeitet. Ziel des Projekts ist die Entwicklung eines industriell verwendbaren Dispensdruckkopfs, wobei aus technologischer Sicht ein stabiler intermittierender Betrieb (gezielte Unterbrechung der Leiterbahnen an den Zellrändern) der Dispensdruckköpfe die größte Herausforderung darstellt. Anschließend werden umfangreiche Tests mit Industriepartnern durchgeführt, mit dem Ziel, den Reifegrad der Technologie so weit zu steigern, dass sie danach direkt in die industrielle Serienproduktion eingeführt werden kann.

1 REM-Aufnahme eines dispensierten Kontaktfingers, der eine Reduktion des Silberpastenverbrauchs auf unter 50 mg pro Solarzelle ermöglicht.



1

## Defekte durch lichtinduzierte Degradation in multikristallinem Silicium

Dr. Wolfram Kwapil | Telefon +49 761 4588-5461 | sipv.characterization@ise.fraunhofer.de

In PERC-Solarzellen tritt eine noch nicht im Detail aufgeklärte lichtinduzierte Degradation der Materialqualität auf, die die industrielle Umsetzung des PERC-Konzepts auf multikristallinem Silicium erschwert. Sie wird entsprechend den Betriebsbedingungen von Solarmodulen als LeTID (light- and elevated temperature induced degradation) bezeichnet. Das Fraunhofer ISE beschäftigt sich im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Forschungsclusters »SolarLIFE« zusammen mit anderen deutschen Forschungsinstituten und Industriepartnern mit der Untersuchung dieses Effekts.

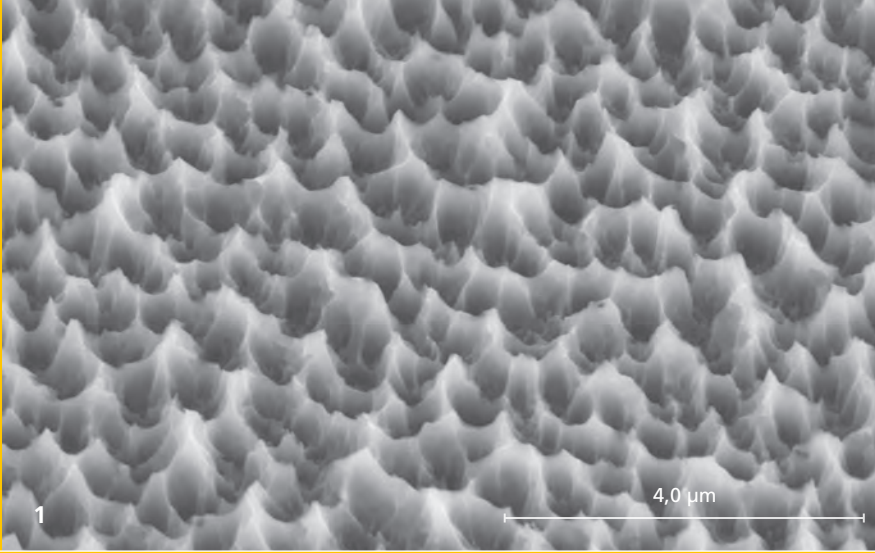
Dabei ist es uns gelungen, der Identifizierung des Defekts einen großen Schritt näher zu kommen. Untersuchungen auf hochreinem (float zone) Silicium zeigten, dass auch dieses Material bei erhöhter Temperatur eine lichtinduzierte Degradation aufweist, wenn es einer typischen PERC-Prozessierungskette unterzogen wird. Bei einer gezielten Untersuchung konnten wir feststellen, dass das Auftreten der Degradation davon abhängt, ob während des Feuerschritts eine Siliciumnitridschicht auf dem Wafer vorhanden ist. Dieses Verhalten wird auch bei multikristallinem Silicium beobachtet, wie beispielhaft in Abb. 1 gezeigt: sogar auf derselben Probe ist das Ausmaß der

Degradation deutlich unterschiedlich, wenn die Siliciumnitridschicht nicht vollflächig aufgetragen wird. Darüber hinaus konnten wir sowohl auf hochreinem als auch auf multikristallinem Silicium beobachten, dass die Stärke der Degradation mit steigender Feuertemperatur zunimmt. Die Degradation und die darauf folgende Erholung fanden in den hochreinen Proben auf einer deutlich kürzeren Zeitskala statt.

Diese Beobachtungen stimmen gut mit Erkenntnissen zur Reaktionskinetik überein, die wir aus Experimenten mit multikristallinen Solarzellen abgeleitet haben. Die spezifischen Vorbehandlungsbedingungen, unter denen LeTID nicht nur in multikristallinem sondern auch in hochreinem Silicium auftritt, deuten auf eine Beteiligung von atomarem Wasserstoff an dem Defekt hin. Dieser wird während des Feuerschritts aus der Siliciumnitridschicht in das Wafer-Volumen eingetragen. Dort ist er eigentlich vorteilhaft, weil viele Defekte durch Wasserstoffanlagerung unschädlich gemacht werden. Wir gehen davon aus, dass es sich bei LeTID um einen Defekt handelt, der erst durch die Anlagerung von Wasserstoff schädlich wird. Weiterführende Untersuchungen zur Aufklärung der übrigen beteiligten Spezies sind in Arbeit.

1 Lumineszenzbasierte Lebensdauer messung auf einem multikristallinen Wafer mit unterschiedlichen Passivierungsschichten: a) Probenschema, b) degradiertes Zustand.





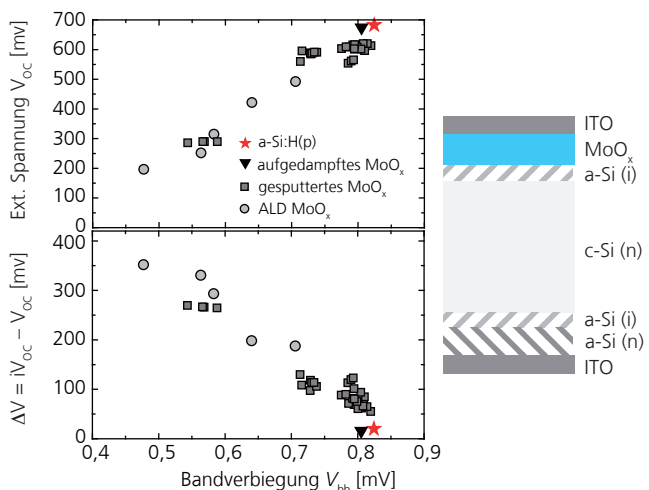
## Neuartige passivierende Kontakte

Prof. Dr. Stefan Glunz | Telefon +49 761 4588-5191 | sipv@ise.fraunhofer.de

Um die Stromgestehungskosten für moderne Siliciumsolarzellen noch weiter zu senken, muss besonders die Rekombination der lichtgenerierten Ladungsträger an den Kontakten reduziert werden. Kontakte mit exzellenten Passivierungseigenschaften können z. B. mit der am Fraunhofer ISE entwickelten TOPCon-Technologie realisiert werden. Dabei lassen wir zunächst eine sehr dünne Oxidschicht auf dem Siliciumwafer aufwachsen und scheiden darauf eine hochdotierte Siliciumschicht ab, deren Kristallstruktur durch einen nachfolgenden Hochtemperatureschritt gezielt eingestellt werden kann. Mit dieser TOPCon-Struktur als Rückseitenkontakt einer monokristallinen n-Typ Siliciumsolarzelle konnten wir auf kleinen Flächen Wirkungsgrade von 25,8% und auf großen Solarzellen von 24,5% erzielen. Auch für multikristallines Silicium eignet sich die TOPCon-Technologie sehr gut, sodass wir den aktuellen Weltrekord auf 22,3% verbessern konnten. Dabei wurde am Fraunhofer ISE nicht nur die gesamte Solarzellentechnologie entwickelt, sondern auch das Kristallwachstum des verwendeten High-Performance multikristallinen Siliciums durchgeführt. Dies zeigt das große Potenzial der am Institut abgebildeten gesamten Wertschöpfungskette vom Material bis ins System. Momentan übertragen wir die TOPCon-Technologie aus der Laborumgebung unseres Reinraums in das PV-TEC, unsere industrielle Pilotlinie für Solarzellen mit passivierenden Kontakten.

Aufgrund der verwendeten hochdotierten Si-Schicht kann es beim Einsatz der TOPCon-Technologie auf der Vorderseite der Solarzelle allerdings zu parasitären Absorptionsverlusten kommen. Deshalb sind wir für diese Anwendung sehr an metalloxidbasierten passivierenden Kontakten interessiert. Hierbei kombinieren wir eine sehr dünne, undotierte, amorphe Si-Schicht (a-Si (i)) mit einer Metalloxidschicht wie Molybdänoxid ( $\text{MoO}_x$ ). Aufgrund der hohen Austrittsarbeit des  $\text{MoO}_x$  kommt es im Silicium zu einer Bandverbiegung, die die Leitfähigkeit für Löcher stark erhöht und so zur gewünschten

Ladungsträgerselektivität führt. Diesen grundlegenden Effekt haben wir eingehend untersucht und  $\text{MoO}_x$  mit verschiedenen Technologien und Zusammensetzungen abgeschieden (s. Grafik). Nur wenn die resultierende Bandverbiegung groß genug ist, kann die durch die Beleuchtung aufgebaute innere Spannung der Solarzelle ( $iV_{oc}$ ) vollständig an den äußeren Kontakten ( $V_{oc}$ ) abgegriffen werden. Mit diesen und anderen Untersuchungen haben wir dieses neue Kontaktsystem gezielt optimiert und als Vorderseitenkontaktsystem von n-Typ Solarzellen eingesetzt. Der dabei erzielte Wirkungsgrad von 22,6% zeigt das große Potenzial dieser Technologie.



**Grafik:** Einfluss der Bandverbiegung auf die externe Spannung der Solarzelle ( $V_{oc}$ ) bei einem  $\text{MoO}_x$ -basierten Kontaktsystem (oben). Bei zu geringen Bandverbiegungen bzw. Austrittsarbeiten der  $\text{MoO}_x$ -Schicht kommt es zu großen Verlusten ( $\Delta V$ ) zwischen der inneren ( $iV_{oc}$ ) und äußeren Spannung ( $V_{oc}$ ) der Zelle (unten). Bei ausreichenden Austrittsarbeiten (ca. 0,8 eV) konnten dagegen die sehr guten Eigenschaften des Referenzsystems aus amorphem Silicium (roter Stern) erreicht werden.

1 Oberflächentextur der multikristallinen Rekordsolarzelle.

# III-V- UND KONZENTRATOR- PHOTOVOLTAIK



55

Mitarbeitende



20

Zeitschriften- und  
Buchbeiträge



11

Vorträge und  
Konferenzbeiträge



3

Neu erteilte Patente

1 *Konzentratorsolarzellen mit Bypass-Diode auf Kühlkörper vor dem Einbau in ein FLATCON® Konzentratormodul.*

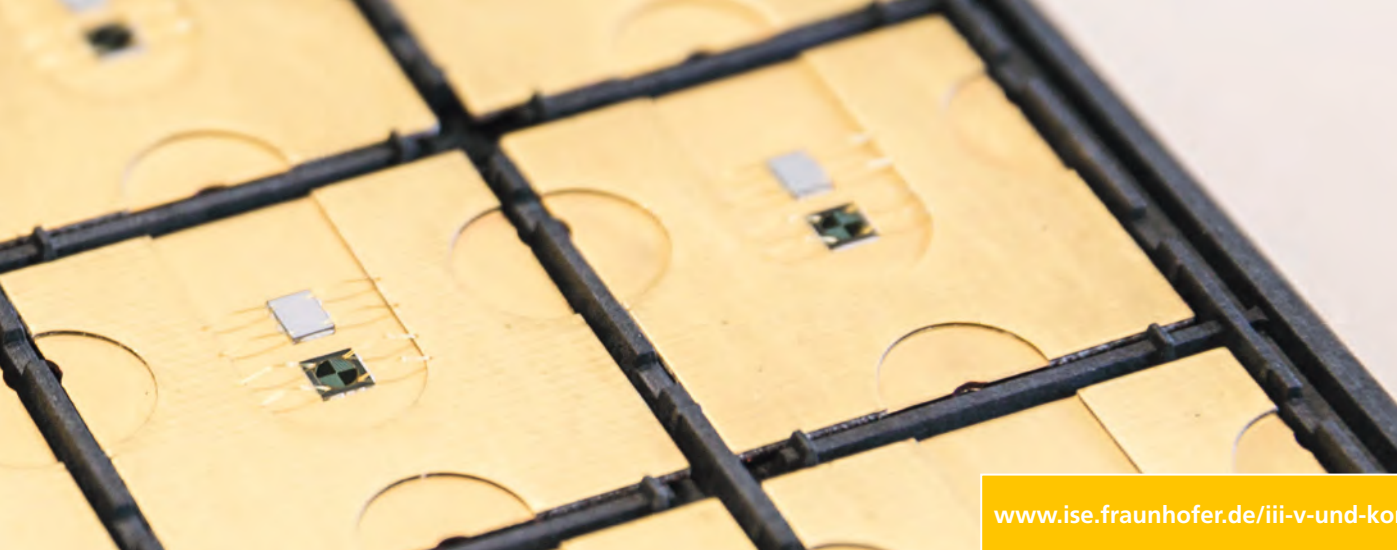
In diesem Geschäftsfeldthema bearbeitet das Fraunhofer ISE Anforderungen aus der Weltraum- und Konzentratorphotovoltaik. Weiterhin adressieren wir die effiziente Umwandlung von Licht aus Quellen wie Lasern in elektrischen Strom. Wir arbeiten sowohl an Solarzellen der nächsten Generation mit optimierten Strukturen und Wirkungsgraden als auch an der Anpassung dieser Bauelemente an die spezifischen Anforderungen unserer Kunden. So entwickeln wir z. B. ultra-dünne und leichte Solarzellen, die sich auf gekrümmten Flächen aufbringen lassen, oder Konzentratorsolarzellen mit Flächen zwischen 0,1 mm<sup>2</sup> und 1 cm<sup>2</sup>. In allen Fällen zielen wir auf Bauelemente mit niedrigen Fertigungskosten, hoher Zuverlässigkeit und hohem Wirkungsgrad.

Bei der konzentrierenden Photovoltaik decken wir alle Aspekte von der Solarzelle bis zum Modul ab und optimieren das Gesamtsystem. Hierfür setzen wir unsere Expertise in den Bereichen Optik, Aufbau und Verbindungstechnik sowie theoretische Modellierung und Moduldesign ein. So bedienen wir einen heterogenen Markt an Unternehmen, die PV-Systeme mit geringer bis sehr hoher optischer Konzentration entwickeln. Bei letzteren erstreckt sich unsere Expertise auch auf Systemaspekte wie die Nutzung von Wärmeenergie oder die direkte Erzeugung von solarem Wasserstoff zur Speicherung von Energie. Wir erreichen Innovationen durch systembezogenes Denken und setzen uns das Ziel, die besten Lösungen weltweit für unsere Kunden bereitzustellen.

Für unsere Arbeiten können wir auf eine exzellente Infrastruktur zurückgreifen. Unsere besondere Expertise liegt in der Entwicklung gitterfehlangepasster Halbleiterstrukturen, die wir über metamorphes Wachstum, Waferbonden oder Wachstum auf »Engineered Substrates« realisieren. So können wir zum Beispiel GaAs mit Silicium oder InP in einem Bauelement vereinen.

## Meilensteine 2017

- » Semiautomatische Fertigung von FLATCON® Konzentratormodulen mit optimiertem Linsen- und Moduldesign etabliert. Die Herstellungsprozesse konnten anhand von Prototypen erfolgreich demonstriert werden. Wir suchen nun Partner für die industrielle Umsetzung.
- » Kostenreduktion von III-V-Halbleiterstrukturen durch optimierte Wachstumsbedingungen. Erstmals wurden GaAs-Schichten für Solarzellen mit Raten von 140 µm/h bei niedrigem AsH<sub>3</sub> Verbrauch gewachsen.
- » Die Weiterentwicklung ultra-dünner Solarzellentechnologie mit Rückseitenspiegel führte zu GaAs-Konzentratorsolarzellen mit 28,8 % Wirkungsgrad unter konzentriertem Licht und Laser-Leistungszellen mit 67,3 % Wirkungsgrad bei Bestrahlung mit einem 860 nm Laser.
- » Grundsteinlegung für das Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen, in dem ab 2020 III-V-Halbleiterbauelemente in modernster Infrastruktur weiter entwickelt werden.



[www.ise.fraunhofer.de/iii-v-und-konzentrator-pv](http://www.ise.fraunhofer.de/iii-v-und-konzentrator-pv)

## Ansprechpartner

### Koordination Geschäftsfeld

Dr. Frank Dimroth | Telefon +49 761 4588-5258  
cpv@ise.fraunhofer.de

### III-V-Epitaxie und Solarzellen

Dr. David Lackner | Telefon +49 761 4588-5332  
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. Florian Clement | Telefon +49 761 4588-5050  
cpv.silicon@ise.fraunhofer.de


### Power-by-Light

Dr. Henning Helmers | Telefon +49 761 4588-5094  
power.by.light@ise.fraunhofer.de

## Ausgewählte Projekte 2017

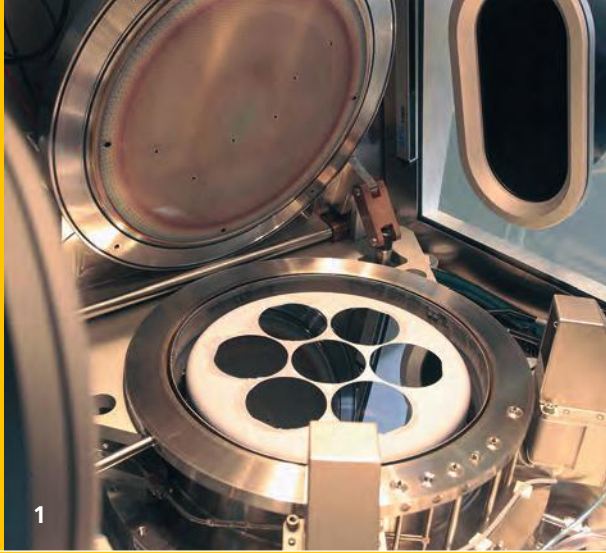
 Nano-Tandem – Tandemsolarzellen auf der Basis von Nanodrähten

 SiTaSol – Anwendungsrelevante Validierung von c-Si basierten Tandemsolarzellenprozessen mit 30 % Zielwirkungsgrad

 ALCHEMI – kostengünstiges, hocheffizientes Opto-elektronisches HCPV-Modul

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten:  
[www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-01](http://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-01)

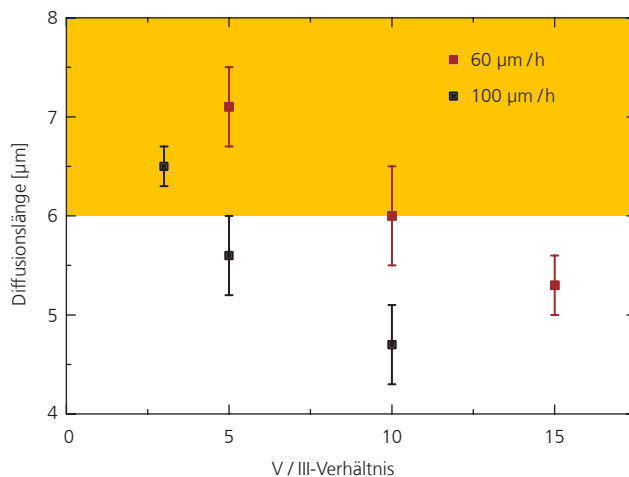




## Kostengünstige Epitaxieprozesse für III-V-Halbleiter

Dr. David Lackner | Telefon +49 761 4588-5332 | cpv.III-V@ise.fraunhofer.de

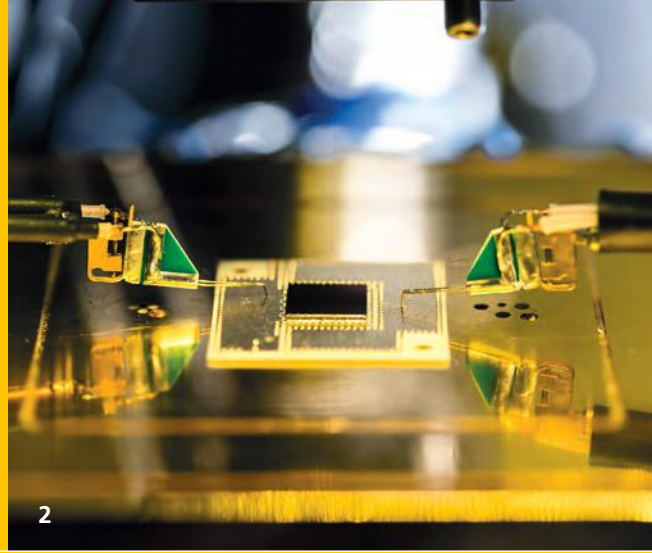
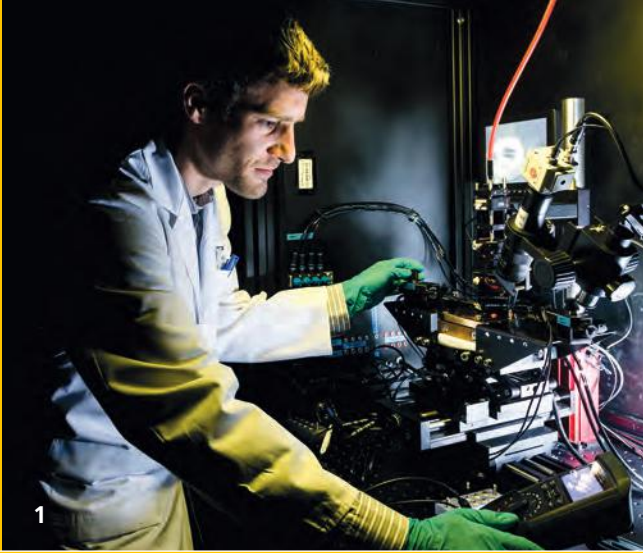
Solarzellen aus III-V-Halbleitern, ob als Einfach- oder Mehrfachzelle, halten zurzeit alle Effizienzrekorde. GaAs-Einfachsolarzellen erreichen bis zu 28,8 % (1 Sonne) und Vierfachsolarzellen des Fraunhofer ISE sogar bis zu 46,1 % (312 Sonnen) Wirkungsgrad. Die hohe Effizienz steht in Kontrast zur geringen Verbreitung der III-V-Solarzellen. Derzeit finden sie vorwiegend in der Raumfahrt kommerziellen Einsatz, da sie hier aufgrund ihrer höheren Toleranz gegenüber Weltraumstrahlung Vorteile bieten. Terrestrisch kommen III-V-Solarzellen in Konzentratormodulen zum Einsatz, die allerdings nur einen geringen Anteil am Photovoltaik-Weltmarkt ausmachen. Eine weitere Verbreitung der III-V-Hocheffizienzsolarzellen ließe sich durch eine Senkung der Kosten für die Ausgangsmaterialien und Epitaxieprozesse erreichen.



*Grafik: Minoritätsladungsträger-Diffusionslänge in p-GaAs als Funktion des V/III-Verhältnisses für Abscheideraten von 60 µm/h (rot) und 100 µm/h (schwarz). Diffusionslängen von über 6 µm sind ausreichend für vollabsorbierende GaAs Solarzellen.*

1 Blick in den III-V-Epitaxiereaktor am Fraunhofer ISE mit einer Beschichtungsfläche von 700 cm<sup>2</sup>.

Genau hier setzen unsere aktuellen Forschungsvorhaben an. Um die Herstellungskosten für die III-V-Epitaxie signifikant zu senken, forschen wir daran, die Abscheideraten um mehr als eine Größenordnung zu erhöhen und gleichzeitig die guten optischen und elektrischen Eigenschaften der Materialien zu erhalten. Hohe Wachstumsraten ermöglichen kürzere Prozesszeiten und reduzieren so den Bedarf an Epitaxieanlagen und der notwendigen Infrastruktur. Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt »MehrSi« konnten wir erstmals die Wachstumsrate für GaAs-Solarzellenschichten von < 10 µm/h auf über 100 µm/h erhöhen. Hierbei wurde eine Produktionsanlage der Firma Aixtron mit einer Abscheidefläche von 700 cm<sup>2</sup> eingesetzt (Abb. 1). Die Schichten weisen Diffusionslängen von über 6 µm und damit eine hohe Kristallqualität auf (s. Grafik). Durch den neuen Prozess kann eine 3 µm dicke GaAs-Absorberschicht der Solarzelle in weniger als 2 min abgeschieden werden. Auch im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundprojekt »KoReMo« adressieren wir hohe Wachstumsraten und setzen dabei ein innovatives Direkt-Verdampfersystem der Firma Sempa ein. Damit wollen wir die Wachstumsraten nicht nur für GaAs-, sondern auch für GaInP-Schichten deutlich erhöhen. Weitere Kostensenkungen erreichen wir durch das direkte Wachstum von III-V-Schichten auf Silicium statt Germanium oder Galliumarsenid. Auf diesem Weg konnten wir bereits GaInP/GaAs/Si-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 19,7 % herstellen. Dies ist derzeit der höchste Wert für eine auf Silicium gewachsene Dreifachsolarzelle, aber das Potenzial liegt noch wesentlich höher. Künftig sollen Prozesse und Materialqualitäten weiter optimiert werden. Ein schnelles und direktes Wachstum der III-V-Schichtstrukturen auf Silicium bietet dann die Chance, die Kosten höchsteffizienter III-V-Solarzellen deutlich zu senken und so neue Märkte zu erobern; z. B. Anwendungen mit begrenzter Fläche wie Autodächer, Drohnen und elektronische Geräte, langfristig auch höchsteffiziente Hausdachanlagen.



## Hocheffiziente photovoltaische Laserleistungszellen

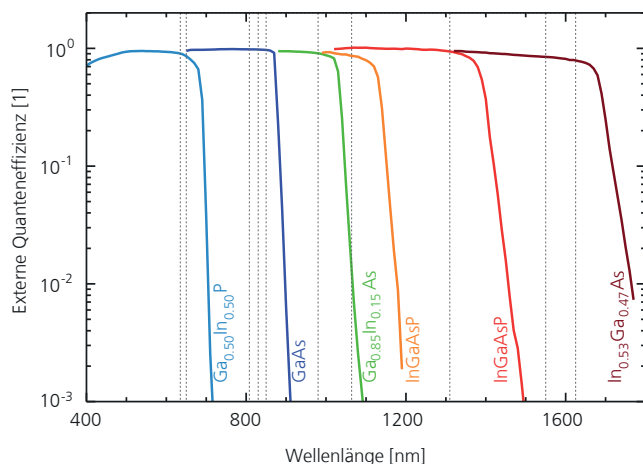
Dr. Henning Helmers | Telefon +49 761 4588-5094 | power.by.light@ise.fraunhofer.de

Im Arbeitsgebiet »Power-by-Light« arbeiten wir am Fraunhofer ISE an hocheffizienten Photovoltaikzellen als Wandler für monochromatisches Laserlicht. Diese werden in optisch versorgten Elektroniksystemen genutzt, d. h. in Systemen, die ihre Energie statt über eine Kabelverbindung aus Laserbestrahlung beziehen. Dadurch wird eine galvanische Trennung zwischen Basis und Empfänger möglich sowie elektromagnetische Verträglichkeit gewährleistet. Zudem können durch die Vermeidung von konventioneller Kupferverkabelung das Funkenbildungsrisiko umgangen und Gewichtsvorteile erreicht werden. Anwendungen dieser optischen Energieübertragung sind sehr vielfältig und reichen von der Versorgung von Sensorik in kritischer Umgebung (z. B. in Flugzeugtanks oder in Hochspannungsbereichen) bis zur drahtlosen Versorgung von Consumer-Elektronik.

Im Gegensatz zu Solarzellen, die für die effiziente Wandlung des gesamten Sonnenspektrums optimiert werden, können bei Laserleistungszellen Transmissions- und Thermalisierungsverluste – die Hauptverlustmechanismen in Solarzellen – nahezu vollständig vermieden werden. Dazu muss allerdings das Absorbermaterial optimal an die Laserwellenlänge angepasst werden. Hierzu entwickeln wir auf unserem Hochdurchsatz MOVPE (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy) Reaktor Absorberschichten aus III-V-Halbleitern von hoher Materialqualität und für unterschiedlichste Anwendungen. Durch Nutzung von III-V-Verbindungshalbleitern und exakte Einstellung der Komposition können wir die Bandlücke optimal an die Photonenenergie der Laserbestrahlung anpassen (s. Grafik).

Auf Basis einer GaAs-Zelle mit hochreflektivem Rückseitenspiegel zur Minimierung optischer Verluste haben wir mit einer  $0,054 \text{ cm}^2$  kleinen Zelle einen monochromatischen Spitzenwirkungsgrad von 67,3 % bei einer Bestrahlung mit 860 nm Laserlicht demonstriert. Mit einer InGaAsP-basierten,  $1 \text{ cm}^2$  großen Zelle haben wir einen monochromatischen Wirkungsgrad von 48,3 % bei 1310 nm erreicht.

Darüber hinaus arbeiten wir an seriell verschalteten Zellarchitekturen mit erhöhter Ausgangsspannung. In der Anwendung ist dies vorteilhaft, da auf zusätzliche elektronische Spannungskonversion verzichtet und damit einhergehende Leistungsverluste vermieden werden können. Hier verfolgen wir sowohl Konzepte zur lateralen Verschaltung mehrerer Segmente auf semi-isolierendem Substrat (»Multi-Segment Zellen« oder MIMs) als auch die vertikale Stapelung und Verschaltung mittels Tunnelndioden (»Mehrfachzellen«).



1 Messaufbau im Fraunhofer ISE CaLab PV Cells für die Messung von Strom-Spannungs-Kennlinien von PV-Zellen unter monochromatischem Licht bei unterschiedlichen Bedingungen.

2 Auf planarem Substrat montierte photovoltaische Laserleistungszelle mit einer aktiven Fläche von  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ .

Grafik: Gemessene externe Quanteneffizienzen von verschiedenen III-V basierten Photovoltaikzellen mit passender Absorptionskante für verschiedene gängige Laserwellenlängen (gestrichelte Linien).

# NEUARTIGE PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIEN

1



**34**

Mitarbeitende



**12**

Zeitschriften- und  
Buchbeiträge



**3**

Vorträge und  
Konferenzbeiträge



**2**

Neu erteilte Patente

Das Geschäftsfeld »Neuartige PV-Technologien« umfasst die Themen Organische, Farbstoff- und Perowskitsolarzellen, Photonenmanagement sowie Mehrfachsolarzellen auf kristallinem Silicium. Ziel ist, mithilfe dieser neuartigen Technologien Optimierungspotenziale in der Photovoltaik zu erschließen und Stromgestehungskosten zu senken. Dazu gehört, den Wirkungsgrad etablierter Solarzellen, z. B. aus kristallinem Silicium, durch verbesserte Absorption und Reflexion mittels fortgeschrittenem Photonenmanagement zu erhöhen. Ein weiterer Ansatz sind alternative Prozesse und Materialien, wie Organische, Farbstoff- und Perowskitsolarzellen, die ein deutliches Kostenreduktionspotenzial aufweisen, was sie trotz der niedrigeren Wirkungsgrade zu vielversprechenden Forschungsobjekten macht.

Unsere Arbeiten an Organischen Solarzellen sind darauf ausgerichtet, flexible, kostengünstige und langzeitstabile organische Solarmodule zu realisieren. Hierfür entwickeln wir zusammen mit Industriepartnern stabile Beschichtungs- und Verkapselungsprozesse auf unserer Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage, um diese anschließend auf große Anlagen zu übertragen.

Im Arbeitsgebiet Perowskitsolarzellen arbeiten wir mit verschiedenen Ansätzen daran, eine ausreichende Langzeitstabilität zu gewährleisten. Neben reinen Perowskitsolarzellen entwickeln wir Silicium-basierte Mehrfachsolarzellen, um das Sonnenspektrum durch Reduktion der Thermalisierungsverluste besser auszunutzen. Diese Strategie verfolgen wir auch mit unseren Arbeiten zu Mehrfachsolarzellen aus einer Kombination von kristallinem Silicium mit III-V-Absorbermaterialien oder Silicium-Nanokristallmaterialien mit einstellbarer Bandlücke. Dazu nutzen wir insbesondere unsere Konzepte zum Photonenmanagement, um eine gute Stromanpassung der Teilzellen zu gewährleisten.

## Meilensteine 2017

- » Photonische Strukturen (diffraktive Gitter) tragen bei einer III-V // Si Mehrfachsolarzelle zu einer Stromerhöhung um  $1,1 \text{ mA/cm}^2$  bei. Dadurch wird der Wirkungsgrad der Solarzelle um 1,9 % absolut gesteigert.
- » Inbetriebnahme von Labor mit hoher Reinheit zur Entwicklung von Perowskit-Silicium-Mehrfachsolarzellen, ausgestattet u. a. mit Glovebox mit angeschlossener Aufdampfkammer.
- » Perowskitsolarzelle mit mehr als 18 % stabilisiertem Wirkungsgrad mit Niedertemperaturprozess zur Anwendung in Perowskit-Silicium-Mehrfachsolarzellen hergestellt.
- » Zertifizierter Wirkungsgrad von 12,6 % für eine monolithische Perowskitsolarzelle mit Graphitelektrode.

1 *Semi-transparentes  
Organisches PV-Modul.*



[www.ise.fraunhofer.de/neuartige-pv-technologien](http://www.ise.fraunhofer.de/neuartige-pv-technologien)

---

## **Ansprechpartner**

### **Koordination Geschäftsfeldthema**

Dr. Uli Würfel | Telefon +49 761 203-4796  
[emergingpv@ise.fraunhofer.de](mailto:emergingpv@ise.fraunhofer.de)

### **Farbstoff- und Perowskitesolarzellen**

Dr. Andreas Hinsch | Telefon +49 761 4588-5417  
[emergingpv.dye@ise.fraunhofer.de](mailto:emergingpv.dye@ise.fraunhofer.de)

### **Organische Solarzellen**

Dr. Uli Würfel | Telefon +49 761 203-4796  
[emergingpv.organic@ise.fraunhofer.de](mailto:emergingpv.organic@ise.fraunhofer.de)

### **Photonenmanagement**

Dr. Jan Christoph Goldschmidt | Telefon +49 761 4588-5475  
[emergingpv.photonics@ise.fraunhofer.de](mailto:emergingpv.photonics@ise.fraunhofer.de)

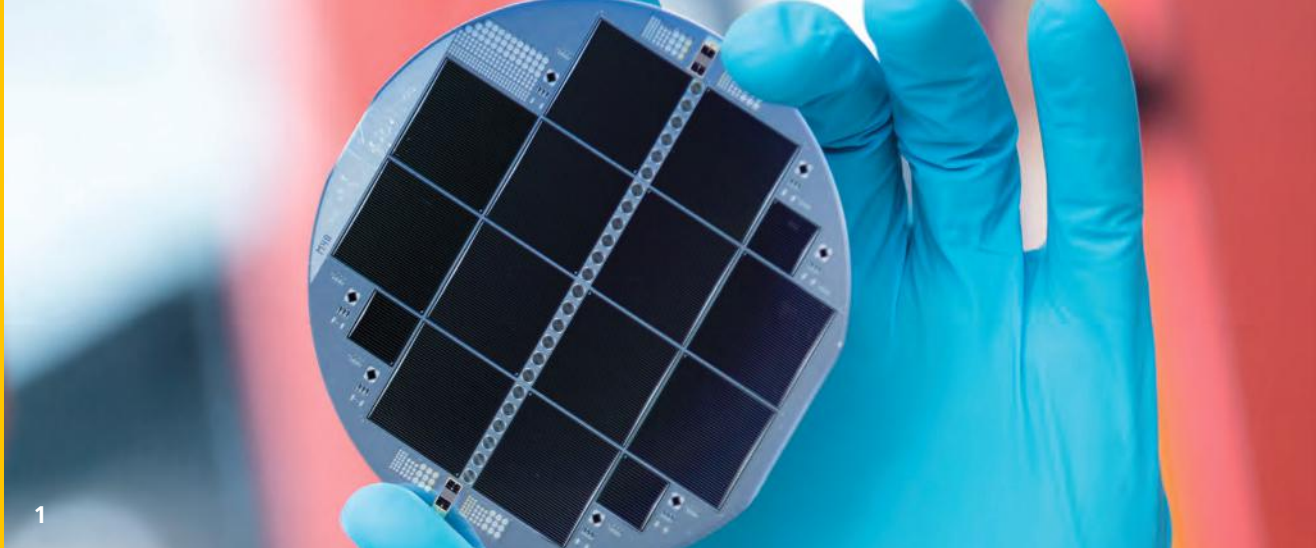
### **Tandemsolarzellen auf kristallinem Silicium**

Dr. Stefan Janz | Telefon +49 761 4588-5261  
[emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de](mailto:emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de)



Mehr Informationen zu Projekten:  
[www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-03](http://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-03)

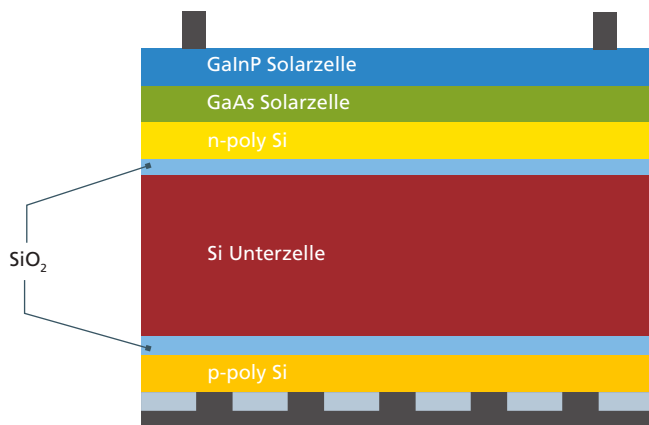




## Mehrfachsolarzellen aus kristallinem Si und III-V-Verbindungshalbleitern

Dr. Stefan Janz | Telefon +49 761 4588-5261 | sipv.csi-thinfilm@ise.fraunhofer.de

Die Entwicklung von Siliciumsolarzellen hat innerhalb der letzten Jahre bemerkenswerte Fortschritte gemacht. Im Labor werden mittlerweile Wirkungsgrade bis 26,7 % und in der Industrie von mehr als 22 % erreicht. Die theoretische Grenze für den Wirkungsgrad von Silicium (29,4 %) rückt damit immer näher. Um auch zukünftig den Wirkungsgrad erhöhen und damit die Kosten für photovoltaisch generierte elektrische Energie weiter senken zu können, sind alternative Zellarchitekturen notwendig.



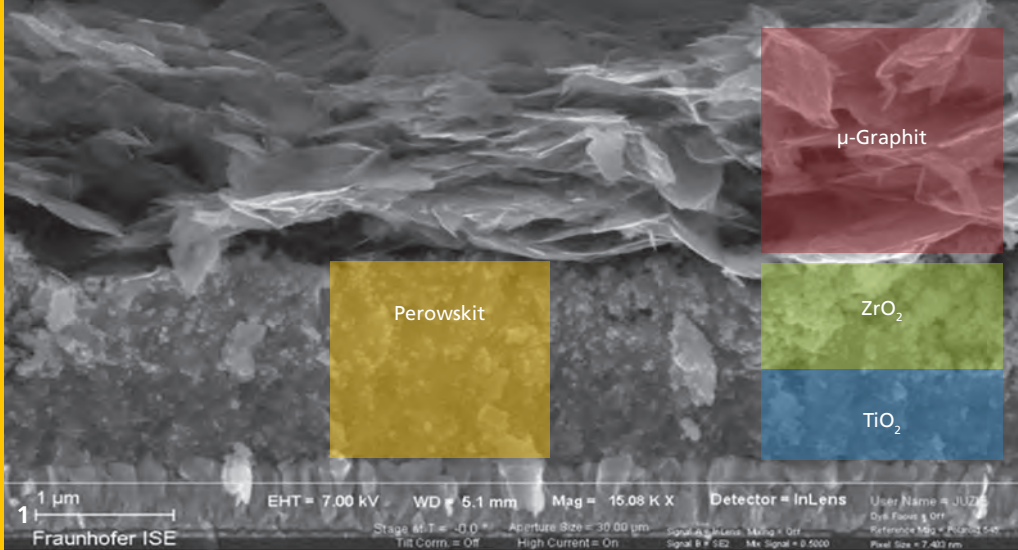
*Grafik: Schematische Darstellung der III-V // Si Mehrfachsolarzelle. Details sind nur für die Siliciumsolarzelle angegeben.*

**1** Am Fraunhofer ISE hergestellte III-V // Si-Mehrfachsolarzellen auf einem Wafer mit 100 mm Durchmesser.

Eine wesentliche Beschränkung für Solarzellen mit nur einer Bandlücke ist die relativ schlechte Ausnutzung des breitbandigen Sonnenspektrums. Bei der Verwendung von Mehrfachsolarzellen mit mehreren Bandlücken können die damit einhergehenden Verluste minimiert und damit höhere Wirkungsgrade erreicht werden. Aufgrund ihrer sehr gut geeigneten Bandlücke sowie der bereits hochskalierten und kostengünstigen Produktionstechnologie bieten sich Siliciumsolarzellen als Unterzellen in einem Tandemaufbau an. Für die oberen Teilzellen mit größerer Bandlücke sind Perowskite oder III-V-Verbindungshalbleiter geeignet. Das Fraunhofer ISE entwickelt z. B. eine Kombination aus einer GaInP (1.9 eV) Oberzelle und einer GaAs (1.4 eV) Mittelzelle auf einer Si (1.1 eV) Unterzelle (s. Grafik).

Wir verfolgen für unsere Mehrfachsolarzellen den Ansatz eines monolithischen Aufbaus, weil dieser die Verschaltung der Einzelzellen im Modul wesentlich vereinfacht. Da das direkte Wachstum der III-V-Materialien aufgrund der unterschiedlichen Gitterkonstanten zu Silicium bisher noch eine herausfordernde Forschungsfragestellung ist, verbinden wir die Teilzellen mittels des Waferbonding-Verfahrens. Dabei werden zwei Halbleiter durch Aneinanderpressen permanent miteinander verbunden. Insgesamt konnten wir mit diesem Zellkonzept Wirkungsgrade (unkonzentriertes Sonnenlicht, AM1.5g) für eine monolithische III-V // Si Mehrfachsolarzelle von 33,3 % erreichen. Dieser Wert wird in den 'Solar Cell Efficiency Tables' in »Progress in Photovoltaics« als höchster Wert für eine 2-Terminal Mehrfachsolarzelle mit Silicium aufgeführt.





## Druckbare in situ Perowskitsolarzellen

Dr. Andreas Hinsch | Telefon +49 761 4588-5417 | [emergingpv.dye@ise.fraunhofer.de](mailto:emergingpv.dye@ise.fraunhofer.de)

Die traditionelle Fertigung von Silicium basierten Solarmodulen beruht darauf, dass zuerst die Solarzellen in Wafergröße produziert werden und anschließend die Verschaltung und Laminierung zu einem fertigen Modul stattfindet. Eine Alternative hierzu stellt ein Konzept dar, bei dem die Solarzellen innerhalb des Moduls quasi in situ erzeugt werden. Dadurch sind Einsparungen bei den Produktionskosten zu erwarten. Als für das in situ Konzept besonders geeignete Materialien untersucht das Fraunhofer ISE lösliche, photovoltaisch aktive Perowskit-Salze der Form  $AMX_3$ .

Ziel der laufenden Projekte ist, druckbare nanoporöse Elektrodenschichten zur Abscheidung und Ankopplung der Perowskit-Kristalle zu entwickeln, den Abscheidungsprozess zu optimieren um somit hohe solare Wirkungsgrade in den fertigen Zellen nachzuweisen. Siebgedruckte poröse Schichten aus  $TiO_2$ ,  $ZrO_2$  und mikronisiertem Graphit ( $\mu-C$ ) wurden von uns optimiert. Die Dicke der photovoltaisch aktiven Zone innerhalb der ersten beiden Schichten liegt hierbei unter einem Mikrometer (Abb. 1).

Die Kontrolle des Abscheidungsprozesses der Perowskit-Kristallite im Inneren der porösen Elektroden ist entscheidend für den solaren Wirkungsgrad. Im Berichtszeitraum konnte ein unkontrolliertes Kristallwachstum vermieden werden, wie es

durch das bisher übliche chemische Ausfällen der Ionen aus einem Lösungsmittel auftritt. Mittels reversibler Adsorption eines polaren Gases gelang es uns, das Perowskit in ein bei Raumtemperatur geschmolzenes Salz umzuwandeln und so die Poren zu füllen. Die kontrollierte Desorption des Gases bewirkt eine physikalische Rekristallisation aus der Schmelze und resultiert in einem homogenen Wachstumsprozess. Solcherart hergestellte photoaktive Schichten weisen eine hohe Ladungsträgerlebensdauer auf, was sich auch in der hohen Photospannung von 1 Volt und dem zurzeit auf Laborzellen mit Graphitelektrode zertifizierten solaren Wirkungsgrad von 12,6 % widerspiegelt. Die für in situ Perowskitsolarzellen auf kleinen Flächen entwickelten Methoden und die erzielten Resultate bilden die Grundlage für den Nachweis der Aufskalierbarkeit. Mit der Entwicklung des geschmolzenen Perowskit-Salzes konnte ein wichtiger Meilenstein erreicht werden. Wir haben bereits erste größere Testmodule zur Untersuchung des Kristallisationsverhaltens und der Langzeitstabilität hergestellt. Neben einer möglichen Anwendung der in situ Perowskitsolarzellen in der Photovoltaik werden die sehr guten Photo- und Elektrolumineszenzeigenschaften auch für den potenziellen Einsatz in der Optoelektronik untersucht.

1 REM-Aufnahme des Querschnitts einer in situ Perowskit-Solarzelle.

# PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND KRAFTWERKE

1



**122**

Mitarbeitende



**8**

Zeitschriften- und  
Buchbeiträge



**19**

Vorträge und  
Konferenzbeiträge



**6**

Neu erteilte Patente

Modultechnologie verwandelt Solarzellen in ein beständiges Produkt für den sicheren Betrieb in PV-Kraftwerken. Im Module-TEC – Module Technology Evaluation Center steht eine große Bandbreite an modernen Prozess- und Analyseplattformen für die Verschaltung und Lamination von Solarzellen bereit, insbesondere zur Materialerprobung, Produkt- und Prozessentwicklung. Über Messungen und Simulationen analysieren wir Zelle-zu-Modul-Bilanzen (CTM).

Die Zuverlässigkeit von Modulen prüft unser Team im akkreditierten TestLab PV Modules für die Zertifizierung nach IEC 61215 und im Hinblick auf besondere Klimalasten und spezifische Degradationsrisiken. Wir unterstützen unsere Kunden bei der Qualifikation von Materialien und bieten umfassende Analysen von Degradations- und Schadensfällen an Modulen. Höchste Präzision bietet auch unser akkreditiertes Kalibrierlabor Callab PV Modules, das mit nur 1,3 % Messunsicherheit bei kristallinen Modulen das weltweit führende Labor ist.

Mit den fünf Phasen des Fraunhofer ISE Qualitätszirkels – Development, Engineering, Procurement, Commissioning und Operation – gewährleisten wir eine umfassende Qualitätssicherung für PV-Kraftwerksprojekte. Unter Einbeziehung von Standort- und Klimafaktoren erstellen wir präzise Ertragsprognosen und beraten bei der projektspezifischen Auswahl hochwertiger Komponenten. Wir entwickeln zuverlässige, probabilistische Methoden für die Leistungsprognose von PV-Anlagen.

Auf Basis unserer Kompetenz auf den Gebieten der Photovoltaik, der Bauphysik und der Energieversorgung von Gebäuden bieten wir Lösungen zur Integration von Photovoltaik in die Gebäudehülle. Auch für spezielle Anwendungen wie die Fahrzeug- und Geräteintegration entwickelt unser Team maßgeschneiderte Solarmodule.

## Meilensteine 2017

- » Entwicklung der Software »SmartCalc.CTM« zur umfassenden Analyse und Optimierung der Effekte, die bei der Integration von Solarzellen in Solarmodule auftreten (Cell-to-Module).
- » Akkreditierung unseres Kalibrierlabors Callab PV Modules für 1,3 % Messunsicherheit bei der Leistungsmessung von Photovoltaikmodulen.
- » Aufbau eines flächendeckenden Messnetzes in Baden-Württemberg für die Echtzeiterfassung von Photovoltaik-Erzeugung durch TransnetBW und Fraunhofer ISE.
- » Durchführung einer Ertragsanalyse für die PV-Stromversorgung von Nutzfahrzeugen, z. B. Kühltransportern, mit real gemessenen Einstrahlungsdaten.

1 Vom Fraunhofer ISE entwickelter Testaufbau für die Kalibrierung von bifazialen PV-Modulen.



[www.ise.fraunhofer.de/photovoltaische-module-und-kraftwerke](http://www.ise.fraunhofer.de/photovoltaische-module-und-kraftwerke)

## Ansprechpartner

### Koordination Geschäftsfeldthema

Dr. Harry Wirth | Telefon +49 761 4588-5858  
pvmod@ise.fraunhofer.de

### Modultechnologie

Dr. Ulrich Eitner | Telefon +49 761 4588-5825  
pvmod.tech@ise.fraunhofer.de

### Modulkalibrierung

Dipl.-Ing. (FH) Frank Neuberger | Telefon +49 761 4588-5280  
pvmod.callab@ise.fraunhofer.de

### Gebrauchsdauer und Schadensanalyse

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Philipp | Telefon +49 761 4588-5414  
pvmod.testlab@ise.fraunhofer.de

### Photovoltaische Kraftwerke

Dipl.-Ing. (BA) Boris Farnung | Telefon +49 761 4588-5471  
pvmod.powerplant@ise.fraunhofer.de

### Bauwerksintegrierte Photovoltaik

Dr. Tilmann Kuhn | Telefon +49 761 4588-5297  
pvmod.bipv@ise.fraunhofer.de


### Solare Einstrahlungs- und Leistungsprognosen


Dr. Elke Lorenz | Telefon +49 761 4588-5015  
pvmod.forecast@ise.fraunhofer.de


### PV for Mobility

Dr. Martin Heinrich | Telefon +49 761 4588-5024  
pvmod.mobility@ise.fraunhofer.de

## Ausgewählte Projekte 2017

 SPEISI – Sicherheit und Zuverlässigkeit von PV-Anlagen mit Speichersystemen unter besonderer Berücksichtigung von Brandrisiken und Löschstrategien

 ALRPO – Selbstlernende Algorithmen zur Leistungsprognose für PV-Anlagen als Instrument zum Energiemanagement von lokalen und Quartierspeichern

 PV Live – Operationelle Bereitstellung von Solarstrahlungs- und simulierten Leistungsdaten von Photovoltaik-Anlagen für Transnet BW

Mehr Informationen zu Projekten:  
[www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-04](http://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-04)

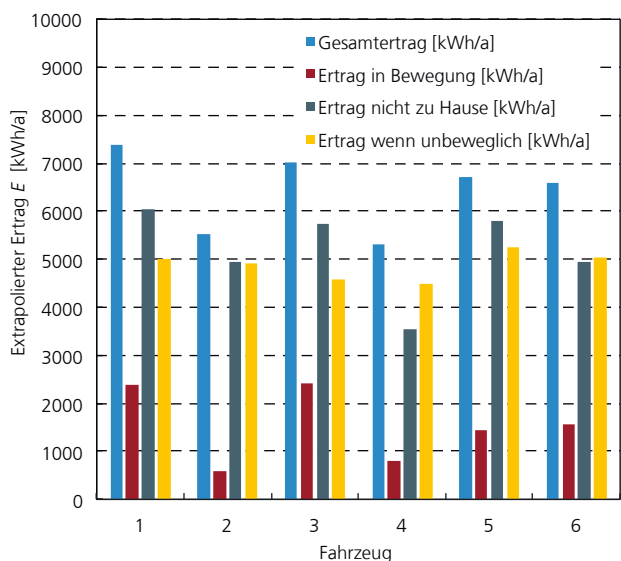




## Photovoltaik auf Nutzfahrzeugen

Dr. Martin Heinrich | Telefon +49 761 4588-5024 | pvmod.mobility@ise.fraunhofer.de

Im neuen Arbeitsgebiet »PV for Mobility« bündelt das Fraunhofer ISE seine Aktivitäten zur Integration von Photovoltaik in Fahrzeugen und Verkehrswegen. Die rasant gesunkenen Kosten für Solarzellen eröffnen neue Anwendungsfelder im Bereich der (Elektro-)Mobilität. So eignen sich z. B. große Dachflächen von Nutzfahrzeugen für anwendungsoptimierte PV-Module in Leichtbauweise zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Transportsektor oder zur Erhöhung der Reichweiten.



*Grafik: Ertragsdaten der untersuchten Fahrzeuge auf ein Jahr berechnet und unter der Annahme einer PV-aktiven Aufliegerfläche eines 40t-Trailers.*

**1** Karte der Solarstrahlung in Europa mit einem Teil der erfassten Routen. © European Union, 2012 PVGIS (map) / topae / shutterstock (truck)

Um dieses Potenzial zu bestimmen, hat das Fraunhofer ISE mit Unterstützung des Fraunhofer CSE in Boston und in Kooperation mit drei Expeditionen sechs LKWs mit einem eigens entwickelten Solarmessaufbau ausgestattet. Die Messdaten umfassen minütlich gemittelte Einstrahlung, Erzeugungsleistung, Temperatur, Position und Geschwindigkeit. Über einen Zeitraum von bis zu 15 Monaten konnten so umfassende und wertvolle Daten auf realen Transportrouten in Mittel- und Südeuropa sowie in Nordamerika gewonnen werden.

Aus den Daten wurde ersichtlich, dass der Betrieb auf Nutzfahrzeugen deutlich andere Anforderungen an das PV-Modul stellt, als in herkömmlichen Aufdach- oder Freiflächenanlagen. So lag z. B. die mittlere Temperatur der Module bei 22,6 °C (-14,0 °C min. und 66,6 °C max.), und es konnte der positive Effekt von Fahrtwind auf die Modultemperatur quantifiziert werden. Die Auswertung der Daten hat weiterhin ergeben, dass die mittlere Einstrahlung bei 277 W/m<sup>2</sup> lag. Als Ergebnis dieser Messkampagne erreichte das Fahrzeug mit dem höchsten Ertragspotenzial rechnerisch 7395 kWh/a, während das Fahrzeug mit dem kleinsten Ertrag immer noch 5297 kWh/a erreichte. Umgerechnet in Dieseläquivalente entspricht dies einer Einsparung von 1513 Liter bis zu 2113 Liter pro Jahr. Weitere wichtige Informationen über Stand- und Fahrzeiten, Bewegungsprofile sowie für die PV-Systemauslegung konnten gesammelt werden.

Die Ergebnisse dieser Messkampagne ermöglichen es uns, eine zielgerichtete Entwicklung und Qualifizierung von PV-Technologie für den Einsatz auf Fahrzeugen in Kooperation mit Partnern aus der Mobilitätsbranche durchzuführen.



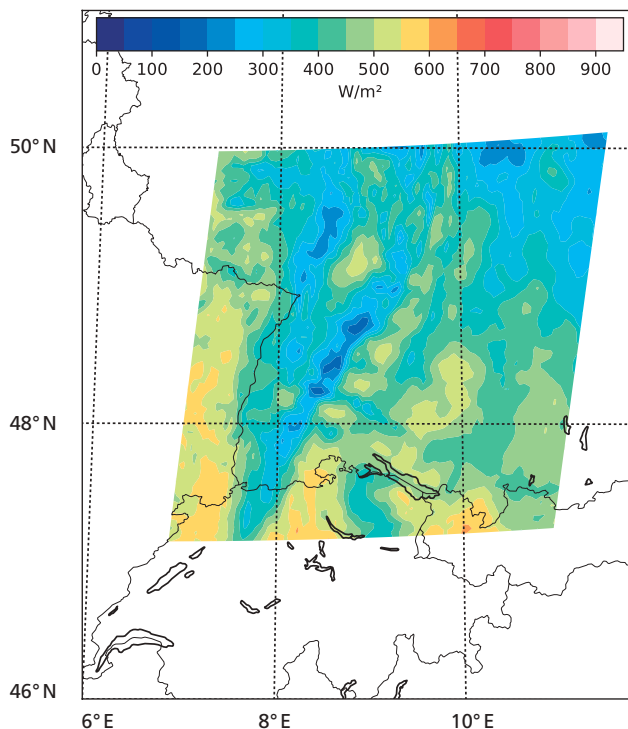
## Satellitendaten und Echtzeit-Strahlungsmessungen für PV-Hochrechnung

Dr. Elke Lorenz | Dipl.-Ing. (BA) Boris Farnung | Telefon +49 761 4588-5015 | pvmod.forecast@ise.fraunhofer.de

Photovoltaik spielt bereits heute eine tragende Rolle im Energiesystem. Mit einer installierten PV-Leistung in Deutschland von aktuell rund 42 GW kann an sonnigen Tagen mittags bereits mehr als 50 % der Last aus Solarstrom gedeckt werden. Die Erzeugung von PV-Strom ist jedoch abhängig von Sonnenstand und Wetter. Um auch zukünftig eine sichere und kosteneffiziente Stromversorgung zu gewährleisten, werden zuverlässige Hochrechnungen und Prognosen der PV-Einspeisung immer wichtiger. Sie sind zum einen die Grundlage für die Vermarktung von PV-Strom an der Börse. Zum anderen können auf Basis der Prognosen netzkritische Situationen bereits frühzeitig erkannt und entsprechende Gegenmaßnahmen ergriffen werden. Insgesamt tragen bessere Prognosen direkt zu geringeren Kosten bei der Netzintegration von PV-Strom bei.

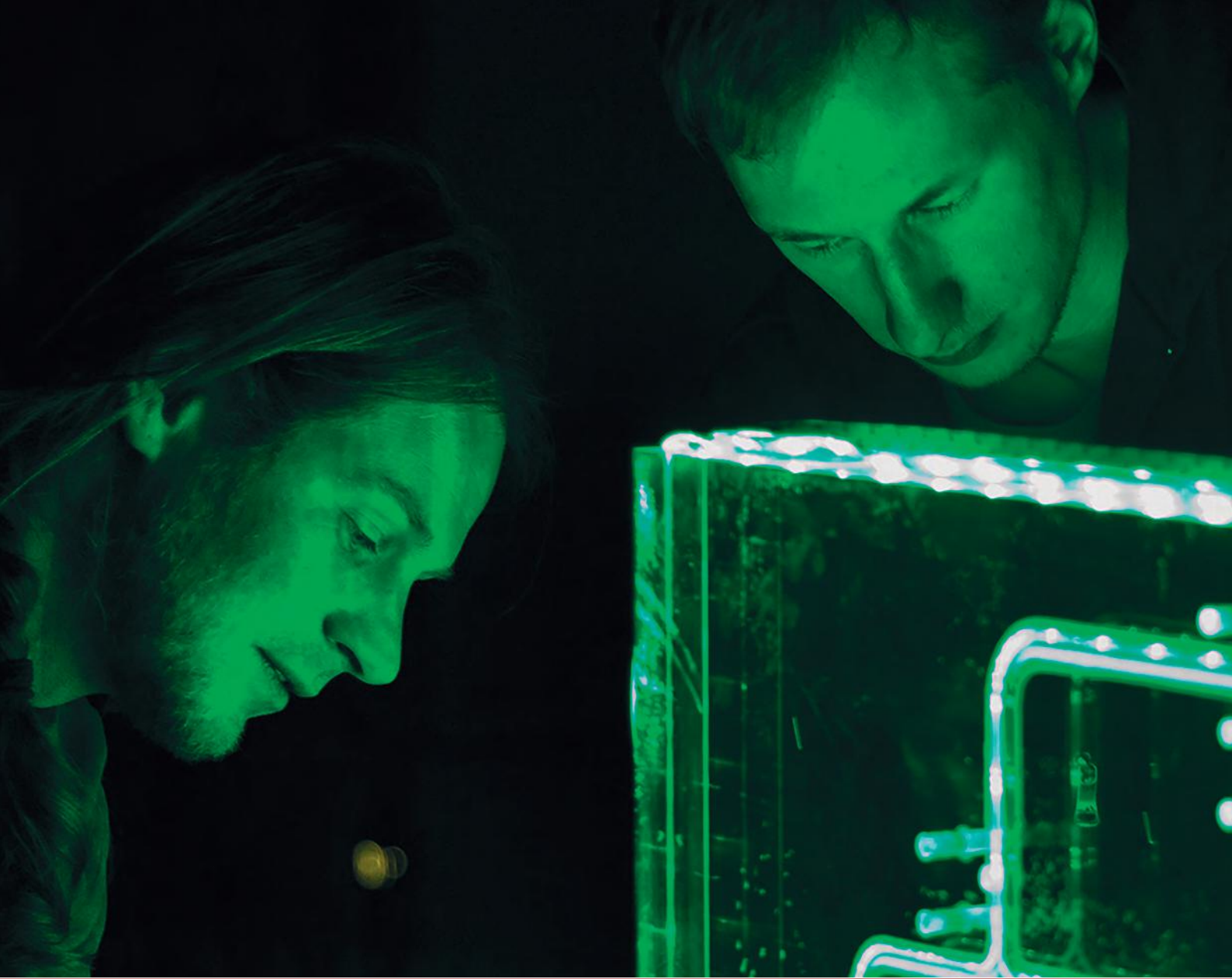
In der Energiemeteorologie entwickeln wir Algorithmen zur Vorhersage der PV-Leistung für Zeiträume von wenigen Minuten bis mehreren Tagen. Ausgangspunkt für eine zuverlässige Vorhersage ist die Ermittlung der aktuellen PV-Leistung in Echtzeit. Diese wird jedoch nur für einen Teil aller in Deutschland installierten PV-Systeme erfasst. Damit ist auch die Gesamteinspeisung in die Regelzonen der Übertragungsnetzbetreiber nicht direkt bekannt. Bisher wird die aktuelle Einspeisung mit PV-Hochrechnungsverfahren auf Basis der verfügbaren Informationen möglichst gut abgeschätzt. Einen innovativen Ansatz zur Hochrechnung der PV-Leistung hat das Fraunhofer ISE im Projekt »PV Live« für den Übertragungsnetzbetreiber TransnetBW entwickelt. Als Eingangsdaten für die Hochrechnung liefern wir im Minutentakt Echtzeitmesswerte der Strahlung sowie simulierte PV-Leistungswerte an TransnetBW. Dazu wurde eine auf die Anforderungen der PV-Hochrechnung optimierte Messstation entwickelt. Die Messstationen wurden in Baden-Württemberg auf die Fläche verteilt aufgebaut, der Abstand zwischen benachbarten Stationen beträgt ca. 15 bis 35 Kilometer.

Ergänzt werden diese Punkt-Messungen um satellitenbasierte Solarstrahlungskarten. Diese stellen wir für das gesamte Netzgebiet im 4-km-Raster viertelstündlich zur Verfügung. Die Kombination von Bodenmessungen und Satellitendaten soll zukünftig neue Ansätze für Hochrechnungsverfahren ermöglichen und diese im Vergleich zu den bisherigen Verfahren deutlich verbessern.



Grafik: Satellitenbasierte Strahlungskarte für Regelzone Transnet.

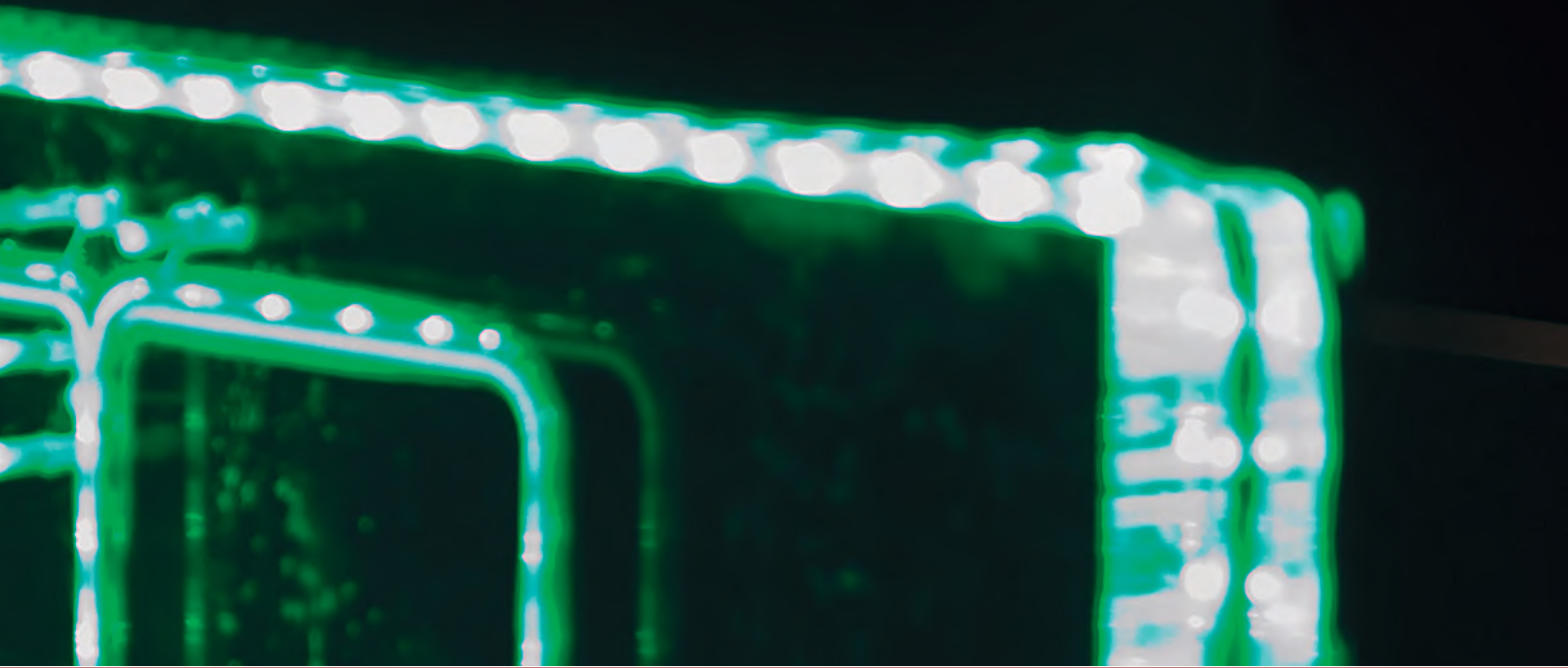
- 1 Satellitendaten ermöglichen ein zeitnahes, hochaufgelöstes Bild der Einstrahlung und der Photovoltaik-Einspeisung. Satellitenbild: © Meteosat Second Generation (EUMETSAT).
- 2 Selbstentwickelte Messstationen mit einem Pyranometer und Silicium-Sensoren unterschiedlicher Ausrichtung senden aktuelle Messwerte im Minutentakt.



# ENERGIETECHNOLOGIEN UND -SYSTEME

Die Energiewende tritt in ihre zweite Phase, und zwar nicht nur in Deutschland, sondern in vielen Ländern, die eine ähnlich hohe Durchdringung der Energieversorgung mit erneuerbaren Energien erreicht haben. Wesentliche Entwicklungen und Kostensenkungen im Bereich der wichtigsten Wandler erneuerbarer Energien, insbesondere zur Nutzung von Windenergie, Solarenergie und Biomasse für die Stromerzeugung, haben bislang – in der ersten Phase der Energiewende – dazu geführt, dass eine bezahlbare Transformation unseres Energiesystems hin zu einer dominanten Versorgung auf Basis erneuerbarer Energiequellen überhaupt erst vorstellbar geworden ist. Ein deutlicher Ausbau der entsprechenden Anlagen in den vergangenen Jahren führte dazu, dass der Anteil erneuerbarer Energien zur Stromversorgung im Jahr 2017 in Deutschland auf 38 % gesteigert werden konnte. Die Sektoren Wärme, Verkehr und Industrie hinken allerdings noch stark hinterher. So beheizen wir unsere Gebäude nach wie vor überwiegend mit Erdgas und Heizöl und Fortbewegung basiert größtenteils auf fossilen Kraftstoffen. Insofern steht nun – in der nächsten Phase – eine umfassende Integration erneuerbarer Energien an, die zugleich eine viel stärkere Kopplung der Sektoren – Strom, Wärme, Verkehr – benötigt. Viel spricht für eine stärkere Elektrifizierung all dieser Sektoren. In zahlreichen Anwendungsfeldern kann Strom, der weiter zunehmend auf Basis erneuerbarer Quellen hergestellt wird, sehr effizient direkt genutzt werden, wie z. B. in Wärmepumpen oder

**i** Vermessung einer neuartigen Verteilerstruktur zur Verdampfung des Kältemittels einer Wärmepumpe.



batterieelektrischen Fahrzeugen. Bereiche, die einer direkten Stromnutzung schwerer zugänglich sind, wie Schwerlast-, Schiffs- und Luftverkehr oder auch Industrieprozesse, können dagegen in wachsendem Maß mit erneuerbaren, chemischen Energieträgern versorgt werden. Auf Grund der begrenzten Biomasseressourcen wird hier Wasserstoff eine zentrale Rolle spielen, der entweder durch Rückkonversion in Strom in stationären oder mobilen Brennstoffzellen oder direkt in Industrieprozessen genutzt werden kann. Wasserstoff kann zudem mit CO<sub>2</sub> in erneuerbare synthetische Brenn- und Kraftstoffe oder Chemikalien für die Industrie weiter konvertiert werden.

Das Fraunhofer ISE hat sich seit seiner Gründung mit vielen Technologien und Fragestellungen befasst, die in dieser anstehenden zweiten Phase der Energiewende von höchster Relevanz sind und die im Bereich »Energietechnologien und -systeme« mit seinen Geschäftsfeldern »Solarthermie«,

»Gebäudeenergietechnik«, »Wasserstofftechnologien« und »Energiesystemtechnik« adressiert werden. Von den vielen nachfolgend und darüber hinaus auf unseren Internet-Seiten dargestellten Projekten und Ergebnissen seien hier nur zwei zentrale Entwicklungen benannt. So haben wir für unser breit aufgestelltes Prüf- und Entwicklungszentrum Wärmepumpen den Prozess zur Akkreditierung nach DIN EN ISO / IEC 17025 durchgeführt, so dass wir nun über die wissenschaftlichen und entwicklungsbegleitenden Arbeiten hinaus auch zertifizierte Prüfungen anbieten können. Für das Jahr 2018 werden wir am neuen Standort Zinkmattenstraße in Freiburg unser deutlich ausgebaut und vergrößertes »Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze« einweihen, in dem Anlagen und Komponenten im Leistungsbereich bis zu 40 MVA und sowohl auf Niederspannung als auch auf Mittelspannungsebene entwickelt, geprüft und getestet werden können.

# SOLARTHERMIE

1



**76**

Mitarbeitende



**20**

Zeitschriften- und Buchbeiträge



**27**

Vorträge und Konferenzbeiträge



**4**

Neu erteilte Patente

1 *Parabolrinnen-Kollektoren des solarthermischen Kraftwerks Andasol 3. Das Fraunhofer ISE testet hier automatisierte Spiegelverschmutzungs-Messgeräte und validiert eigene Software mit Betriebsdaten des Kraftwerks.*

Solarthermische Verfahren können in vielfältiger Weise beim Umbau unserer Energiesysteme Verwendung finden. Das Fraunhofer ISE trägt dazu mit kostengünstigen Materialien, Produktionsverfahren und Komponenten sowie mit betriebs- und volkswirtschaftlich optimierten Gesamtsystemen bei.

Im Geschäftsfeld »Solarthermie« beschäftigen wir uns mit Optik und Oberflächentechnik, um Solarstrahlung besser zu nutzen. Niedertemperatur-Solarthermiesysteme mit Wasser oder Luft als Wärmeträger untersuchen wir, um damit Brauchwasser, Gebäude und Industrieprozesse effizienter zu erwärmen. Kombinierte photovoltaisch-thermische Kollektoren erlauben uns, Strom und Wärme gleichzeitig auf ein und derselben Fläche zu erzeugen. Wir arbeiten an fassaden- und dachintegrierten Lösungen, die hervorragende architektonische Möglichkeiten bieten, Solarthermie in die Gebäudehülle zu integrieren und multifunktional zu nutzen. Mit konzentrierenden Kollektoren können Temperaturen von mehreren hundert Grad erzeugt werden. Wir erforschen, wie damit in solarthermischen Großkraftwerken zugleich Strom, Wärme für industrielle Prozesse sowie Dampf und Antriebswärme für Sorptionskältemaschinen generiert werden können. Wir arbeiten an energieeffizienten thermischen Speichern im Nieder- und Hochtemperaturbereich, da sie zentral für unser künftiges Energiesystem sind. Zudem optimieren wir thermisch angetriebene Membranverfahren zur Reinigung oder Aufkonzentrierung von Reststoffen in industriellen Abwässern oder zur Erzeugung von Trinkwasser aus Meerwasser.

Das Fraunhofer ISE verfügt über profunde Kompetenzen in Materialwissenschaften, Komponentendesign, Charakterisierung und Prüfverfahren, theoretischer Modellierung und Simulation, Anlagenregelung und Systementwicklung. Darüber hinaus besitzt das Institut umfangreiche Erfahrung in den verschiedensten Anwendungen.

## Meilensteine 2017

- » Inbetriebnahme eines innovativen Wärmeversorgungsnetzes mit zentraler Wärmeversorgung und dezentraler solarthermischer Energieversorgung für die effizienzoptimierte Kombination aus Kraft-Wärme-Kopplung und Solarthermie im thermischen Netzverbund.
- » 2–17 % energiewirtschaftliches Potenzial von Solarwärme im urbanen Wärmeversorgungssystem verschiedener Länder identifiziert (IEA SHC Task 52).
- » Hocheffiziente Prototypen eines kombinierten photovoltaisch-thermischen Kollektors mit optimierter Low-Emission-Beschichtung erfolgreich getestet.
- » Langlebigkeitsnachweis marktgängiger Qualitätskollektoren (»SpeedColl«, BMWi gefördert).
- » Experimenteller Nachweis guter thermischer Schichtung in einem auf Salzschnmelzen basierenden Hochtemperatur-Eintank-Speicher.
- » Neues Verfahren zur Leistungsbestimmung linienfokussierender Kollektoren und Solarfelder auf Basis dynamischer Betriebsdaten.





[www.ise.fraunhofer.de/solarthermie](http://www.ise.fraunhofer.de/solarthermie)

---

## Ansprechpartner

### Koordination Geschäftsfeld

Dr. Wolfgang Kramer | Telefon +49 761 4588-5096  
soltherm@ise.fraunhofer.de

### Materialforschung und Optik

Dr. Peter Nitz | Telefon +49 761 4588-5410  
soltherm.materials@ise.fraunhofer.de

### Thermische Kollektoren und Komponenten

Dr. Wolfgang Kramer | Telefon +49 761 4588-5096  
soltherm.collectors@ise.fraunhofer.de

### Thermische Anlagentechnik

Dr. Peter Nitz | Telefon +49 761 4588-5410  
soltherm.systems@ise.fraunhofer.de

### Thermische Speicher für Kraftwerke und Industrie

Dr. Thomas Fluri | Telefon +49 761 4588-5994  
soltherm.storage@ise.fraunhofer.de

### Wasseraufbereitung

Dr. Joachim Koschikowski | Telefon +49 761 4588-5294  
soltherm.water@ise.fraunhofer.de

---

## Ausgewählte Projekte 2017

-  RAISELIFE – Raising the Lifetime of Functional Materials for Concentrated Solar Power Technology
-  SolVapor – Integration von Solarkollektoren in industrielle Prozessdampfanlagen
-  ZeKon in situ – Entwicklung eines Zertifizierungskonzepts für große solarthermische Anlagen auf der Basis von in situ Messungen zur Nutzung für eine kostenreduzierte Markterschließung
-  IKI Solar Payback – Technische Unterstützung für die Entwicklung von Inhalten und Aktivitäten im Rahmen des Projekts Solar Payback
-  MENA CSP KIP – Middle East and North Africa Concentrating Solar Power Knowledge and Innovation Program
-  HelioControl – Entwicklung eines kamerabasierten Kalibrier- und Regelungssystems mit geschlossenem Regelkreis für Heliostatenfelder
-  MinWaterCSP – Minimierter Wasserverbrauch in CSP-Anlagen
-  TrustEE – Innovativer Marktbasierter »Trust for Energy Efficiency Investments in Industry«
-  INSHIP – Integration nationaler Forschungsagenden für solare Prozesswärme
-  EnWiSol – Solarthermie in der städtischen Energieversorgung, Energiewirtschaftliche Analyse und Demonstrationsvorhaben Freiburg-Gutleutmaten

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten:  
[www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/2-00](http://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/2-00)





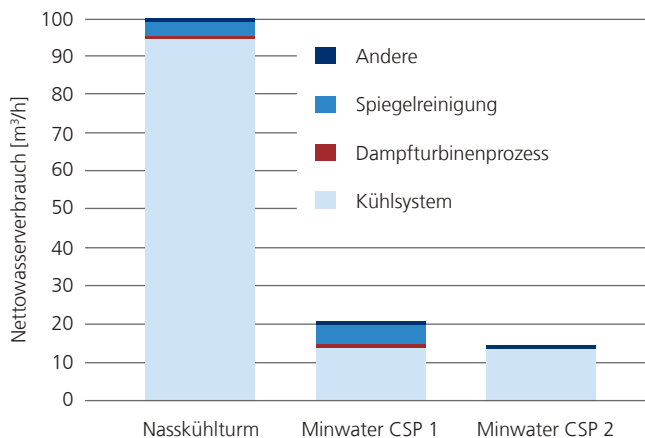
## Solarthermische Kraftwerke mit geringem Wasserverbrauch

Anna Heimsath | Telefon +49 761 4588-5944 | soltherm.materials@ise.fraunhofer.de

Solarthermische Kraftwerke mit Hochtemperaturspeichern ermöglichen es, solare Einstrahlung und Stromerzeugung zu entkoppeln und sorgen damit für eine bedarfsgerechte Stromversorgung im Mix erneuerbarer Energien. Da solarthermische Kraftwerke oft in ariden Regionen mit hoher Direktstrahlung, aber auch hohem Staubanfall liegen, sind Ertragsminderung und Reinigungskosten durch standortspezifische Verschmutzung ein wichtiges Thema. Besonders in wasserarmen Regionen zeigt sich die Notwendigkeit, innovative Lösungen

zu entwickeln, die den Wasserverbrauch von solarthermischen Kraftwerken signifikant reduzieren. Am Fraunhofer ISE arbeiten wir an Technologien, um die Effizienz der Kraftwerke zu steigern und entwickeln Methoden zur Verringerung des Wasserverbrauchs.

Um die Leistung im Kraftwerksbetrieb zu erhöhen sowie Reinigungszyklen vorhersagen und optimieren zu können, entwickeln wir gemeinsam mit Industriepartnern Geräte und Verfahren zur Erfassung von Verschmutzung. Mit den auf optischen Messungen basierenden Verfahren wird die Verschmutzung im Zeitverlauf zuverlässig und genau aufgezeichnet. Prototypen des »AVUS« Verschmutzungsmessgeräts zur automatisierten Erfassung der reduzierten Reflexion von Solarspiegeln wurden im Kraftwerk »Andasol 3« in Spanien installiert (Abb. 1). In Kombination mit anderen Wetterdaten tragen die am Fraunhofer ISE entwickelten Methoden in Zukunft zu verbesserten Betriebs- und Reinigungsstrategien bei. Das portable Reflektometer »pFlex« ist für schnelle manuelle Messungen im Solarfeld geeignet (Abb. 2). Weiterentwicklungen ermöglichen in Zukunft die großflächige Erfassung der Verschmutzung im Solarfeld.



Grafik: Nasskühlung gegenüber der hybriden Kühlung ohne (MinWaterCSP 1) und mit interner Wasserwiederverwendung (MinWaterCSP 2).

- 1 Messsystem »AVUS« für das automatisierte Monitoring von Verschmutzungen in solarthermischen Kraftwerken.
- 2 Verschmutzungsmessung im solarthermischen Kraftwerk mit dem am Fraunhofer ISE entwickelten Messgerät »pFlex«.

Um den Wasserverbrauch im gesamten solarthermischen Kraftwerk zu verringern, arbeiten wir am Fraunhofer ISE an der Reduktion des Kühlwasserverbrauchs, der Wasseraufbereitung und wassersparenden Reinigungskonzepten. Ein wichtiger Baustein zur Reduzierung des Wasserverbrauchs ist auch die Integration des Wassermanagements in unsere Simulationswerkzeuge (z. B. ColsimCSP). Die Entwicklung von umfassenden Wassermanagementplänen (s. Grafik) trägt neben der Technologieentwicklung dazu bei, die Anlagen weniger abhängig von der Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger Wasserquellen zu machen.



## Innovative Ansätze für die solare Wärmeversorgung von Gebäuden

Dr. Wolfgang Kramer | Telefon +49 761 4588-5096 | [soltherm.collectors@ise.fraunhofer.de](mailto:soltherm.collectors@ise.fraunhofer.de)

Einen wesentlichen Beitrag zum Erfolg der Energiewende können innovative solare Heizungssysteme leisten, die den überwiegenden Teil der notwendigen Wärme zur Beheizung von einzelnen Gebäuden und zur Erwärmung von Trinkwasser bereitstellen. Derartige innovative Heizungssysteme haben wir im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt »HeizSolar« untersucht. Sie sind wesentlich, um die für die Zukunft geforderten Nahe-Null-Energieanforderungen an Gebäude – wie sie durch die EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) der EU definiert werden – erfüllen zu können. Unsere Ergebnisse im Projekt »HeizSolar« zeigen, wie solarthermische Gebäudeheizungen kostengünstig umgesetzt werden können.

Aber nicht nur für Einzelgebäude, sondern besonders auch für Gebäude im thermischen Netzverbund sind solarthermische Ansätze vielversprechend. Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützten Projekt »EnWiSol« werden dezentrale thermische Anlagen mit einer zentralen Wärmeversorgung, die auf Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) basiert, über ein Wärmenetz kombiniert. Hinter diesem Konzept steckt zum einen die Idee, Wärmeverluste des Wärmenetzes im sommerlichen Schwachlastbetrieb erheblich zu reduzieren. In dieser Zeit kann das Netz zeitweise abgeschaltet werden, die solarthermischen Anlagen übernehmen dann komplett die Wärmeversorgung. Zum anderen ermöglicht ein solches Konzept, bei einem zu erwartenden künftigen Stromüberschuss im Sommer die dann unwirtschaftliche Wärmeversorgung mit

Kraft-Wärme-Kopplung durch Solarwärme zu ersetzen. Entscheidend dafür, welche erneuerbaren Technologien sich im Kontext der Umstellung unseres Energiesystems durchsetzen werden, sind neben dem Aspekt der betriebswirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit die volkswirtschaftliche Kostenbetrachtung sowie die gesellschaftliche Akzeptanz und der politische Wille, bestimmte Technologieoptionen zu fördern. Für den Erfolg von solarthermischen Heizungssystemen gilt es vorrangig, die Kosten der Anlagen für die Nutzer zu senken.

Bei der Betrachtung der gesamten Prozesskette fällt auf, dass wesentliche Kosten außerhalb des eigentlichen Fertigungsprozesses der Komponenten entstehen. Daher sind innovative Ansätze wichtig, die nicht nur die Kostenoptimierung der Komponenten berücksichtigen. Das Fraunhofer ISE entwickelt gemeinsam mit der RWTH Aachen im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt »TEWISol« eine innovative Methodik zur Analyse der gesamten Prozesskette. Die Wertschöpfung, von der Produktentwicklung über die Fertigungsprozesse bei den Herstellern von Komponenten und Systemen, bis zur Installation sowie der Inbetriebnahme der Anlagen durch Handwerksbetriebe, soll damit untersucht und optimiert werden können. Daraus ergeben sich Hinweise, welche technischen Vereinfachungen und Standardisierungen von Komponenten und Systemen, welche Änderungen der Prozesskette und welche Produktkomplexität den Markterwartungen entsprechen und gleichzeitig maximale Kostenvorteile bieten.

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

# GEBÄUDEENERGIETECHNIK

1



**194**

Mitarbeitende



**34**

Zeitschriften- und  
Buchbeiträge



**38**

Vorträge und  
Konferenzbeiträge



**4**

Neu erteilte Patente

Über 40 % des Endenergiebedarfs in Deutschland entfällt auf den Gebäudesektor. Diesem kommt daher eine zentrale Rolle bei der Erreichung von Klimaschutzziele zu. Ziel ist es, den Einsatz fossiler Energien für den Betrieb von Gebäuden kontinuierlich abzusenken und langfristig vollständig zu vermeiden. Hierfür spielen zwei grundsätzliche Lösungsansätze die entscheidende Rolle: Zum einen geht es darum, den Energiebedarf zu reduzieren, und zum anderen, den verbleibenden Bedarf möglichst vollständig mit erneuerbaren Energien zu decken.

Unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Reduktion des Raumwärme- und Raumkältebedarfs im transparenten Bereich der Gebäudehülle umfassen neue Verglasungstechnologien wie schaltbare Schichten und angepasste Sonnenschutzsteuerungen. Andere Konzepte nutzen die Gebäudehülle auch für die Energiegewinnung, z. B. mit gebäudeintegrierter Photovoltaik. Hierfür haben wir farbige Abdeckscheiben entwickelt, die bei hoher Energieperformance architektonischen Gestaltungsspielraum ermöglichen.

Für die Wärmeversorgung von Gebäuden werden zukünftig Wärmepumpen eine immer wichtigere Rolle spielen. Wärmepumpen sind eine Technologie, bei der wir von der Komponentenentwicklung im Kältekreis über die Geräte- und Anlagenentwicklung bis hin zur Qualitätssicherung im realen Betrieb die gesamte Wertschöpfungskette abdecken.

Gesamtenergiekonzepte und deren Planung mit digitalen Methoden wie Building Information Modelling (BIM) werden immer wichtiger, gerade wenn es um die Sicherstellung einer hohen energetischen Qualität von Planung und Gebäudebetrieb unter Einsatz erneuerbarer Energien geht. Betriebsführungskonzepte und Fehleranalyseverfahren sowie deren hard- und softwaretechnische Umsetzung sind deshalb weitere wichtige Arbeitsfelder des Fraunhofer ISE im Bereich der Gebäudeenergie-technik.

1 Beschichtung für eine Prozessintensivierung in der Entfeuchtungs- und Wärmepumpentechnik. Mit der vom Fraunhofer ISE patentierten Technologie werden Adsorbentien auf Wärmeübertrager aufgebracht.

## Meilensteine 2017

- » Neu entwickelte farbige Abdeckscheiben für PV-Module, mit denen Gebäude sowohl ansprechend aussehen als auch Strom erzeugen können.
- » Analyse der zentralen Rolle von Wärmepumpen bei der Sanierung von Bestandsmehrfamilienhäusern: »WP Smart im Bestand« (BMW gefördert).
- » Entwicklung einer Propan-Wärmepumpe mit deutlich reduzierter Kältemittelfüllmenge (76 g/kW Heizleistung) im Projekt »Green Heat Pump« (EU gefördert).



---

## Ansprechpartner

### Koordination Geschäftsfeld

Dr. Peter Schossig | Telefon +49 761 4588-5130  
[building@ise.fraunhofer.de](mailto:building@ise.fraunhofer.de)

### Gebäudehülle

Dr. Tilmann Kuhn | Telefon +49 761 4588-5297  
[building.envelope@ise.fraunhofer.de](mailto:building.envelope@ise.fraunhofer.de)

### Wärme- und Kälteversorgung

Dr. Peter Schossig | Telefon +49 761 4588-5130  
[building.heating-cooling@ise.fraunhofer.de](mailto:building.heating-cooling@ise.fraunhofer.de)

### Betriebsführung und Gesamtenergiekonzepte

Dipl.-Ing. Sebastian Herkel | Telefon +49 761 4588-5117  
[building.concepts@ise.fraunhofer.de](mailto:building.concepts@ise.fraunhofer.de)

### Thermische Speicher für Gebäude


Dipl.-Biol. Stefan Gschwander | Telefon +49 761 4588-5494  
[building.thermal-storage@ise.fraunhofer.de](mailto:building.thermal-storage@ise.fraunhofer.de)


### Materialien und Komponenten für Wärmetransformation


Dr. Stefan Henninger | Dr. Lena Schnabel  
Telefon +49 761 4588-5104  
[building.heattransfer-materials-components@ise.fraunhofer.de](mailto:building.heattransfer-materials-components@ise.fraunhofer.de)


---


## Ausgewählte Projekte 2017


 CRAVEzero – Kostenreduktion und Beschleunigung der Marktdurchdringung für nachhaltige nahezu Nullenergiegebäude

 EnWiSol – Solarthermie in der städtischen Energieversorgung, energiewirtschaftliche Analyse und Demonstrationsvorhaben Freiburg-Gutleutmatten

 FlexGeber – Demonstration von Flexibilitätsoptionen im Gebäudesektor und deren Interaktion mit dem Energiesystem Deutschlands

 LowEx-Bestand Analyse – LowEx-Konzepte für die Wärmeversorgung von Mehrfamilien-Bestandsgebäuden

 synGHD – Synthetische Lastprofile für eine effiziente Versorgungsplanung für Nicht-Wohngebäude

 follow-e2 – Energiesparende funktionelle Beschichtungen von Polymermaterialien für die Folienarchitektur

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten:  
[www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/3-00](http://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/3-00)



1



## Attraktive und kostengünstige BIPV-Bauprodukte

Dr. Tilmann E. Kuhn | Telefon +49 761 4588-5297 | [bipv@ise.fraunhofer.de](mailto:bipv@ise.fraunhofer.de)

Nullenergiegebäude und Plusenergiegebäude mit bauwerkintegrierter PV (BIPV) sind wichtige Bausteine für die Energiewende. Aber nicht nur auf einzelne Gebäude bezogen besteht Konsens darüber, dass Solarstrom aus PV-Anlagen ein wichtiger Grundpfeiler für die zukünftige Energieversorgung sein wird. Studien des Fraunhofer ISE zeigen, dass in einem regenerativen Energiesystem eine Photovoltaikleistung von bis zu 300 GW Peak benötigt wird, was einer Fläche von bis zu 36 m<sup>2</sup> pro Einwohner in Deutschland entspricht. In einer 2017 abgeschlossenen Dissertation konnte gezeigt werden, dass die ökonomisch nutzbare Fläche an Gebäudehüllen diesen Flächenbedarf bei weitem übersteigt und dass neben Dächern auch Fassaden relevante Flächenpotenziale bieten. Aufgrund der nochmals stark gesunkenen Preise für Photovoltaik amortisieren sich die Mehrkosten für Bauprodukte mit PV-Funktion schon heute oft nach wenigen Jahren. Um einem BIPV-Massenmarkt zum Durchbruch zu verhelfen, müssen die Kosten noch weiter gesenkt und auch die Attraktivität der BIPV-Bauprodukte gesteigert werden.

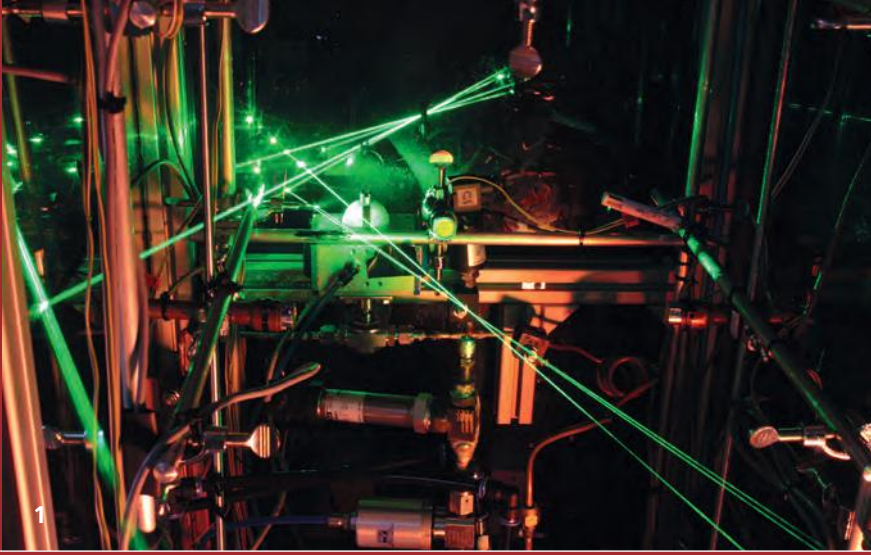
Das Fraunhofer ISE verfolgt dazu verschiedene Lösungsansätze. Zum einen haben wir 2017 ein Patent angemeldet für eine Farbschicht auf BIPV-Modulen mit hoher Sättigung, guter Winkelstabilität des Farbeindrucks und nur geringfügigem Wirkungsgradverlust (deutlich unter 10%<sub>rel</sub>). Die hierbei nicht mehr sichtbare PV-Modulstruktur erhöht die Attraktivität von BIPV deutlich (Abb. 1). Der Ansatz beruht auf farbigen

photonischen Strukturen nach dem Vorbild des Morpho-Schmetterlingsflügels. Die Farbwirkung entsteht durch die Wechselwirkung von geometrischen Strukturen und Interferenzschichten auf der Innenseite des Modul-Deckglases. Die Schicht lässt sich mit kostengünstigen industriellen Beschichtungsprozessen fertigen.

Zudem arbeiten wir an standardisierten BIPV-Produkten. Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt »StandardBIPV« haben wir eine detaillierte Analyse des Gebäudebestands in Deutschland durchgeführt, um Bauwerkskategorien zu identifizieren, die mit vorgefertigten und standardisierten BIPV-Fassaden renoviert werden können. Im Projekt wird z. B. die Kategorie »Industriehallen« detailliert untersucht, die in Deutschland allein mehr als 100 Mio. m<sup>2</sup> Fassadenfläche umfasst.

Ein weiterer Ansatz zur Kostensenkung ist die Vereinfachung der Projektplanung. Bei Anlagen mit objektspezifisch hergestellten BIPV-Modulen und komplexen Verschattungssituationen ist eine detaillierte Planung erforderlich, wenn sichergestellt werden soll, dass der Ertrag der Anlage zuverlässig und hoch ist. Hier unterstützt das Fraunhofer ISE zum einen die Planer direkt und arbeitet zum anderen im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützten Projekt »SolConPro« daran, solar aktive Fassaden mit Methoden des Building Information Modeling (BIM) ganzheitlich in den Planungsprozess zu integrieren.

**1** *Die leuchtende, individuell anpassbare Farbgebung dieser Module und der hohe Wirkungsgrad sind einmalig in der Branche.*



## Wärmepumpen mit klimafreundlichen Kältemitteln

Dr. Lena Schnabel | Telefon +49 761 4588-5412 | [building.heattransfer-materials-components@ise.fraunhofer.de](mailto:building.heattransfer-materials-components@ise.fraunhofer.de)

Ein stärkerer Einsatz von Wärmepumpen in Gebäudetechnik und Industrie ist für die erfolgreiche Umsetzung der Energiewende essenziell. Bisher bleibt allerdings das Marktwachstum dieser Effizienztechnologie hinter den Notwendigkeiten zurück. Sie kann daher noch keinen signifikanten Beitrag zur Erreichung der Energiesparziele leisten. Grund dafür sind die hohen Anforderungen im Markt hinsichtlich Kosteneffizienz, Geräuschemissionen, Betriebssicherheit, Funktionsintegration, Design und Umweltfreundlichkeit. Diese machen eine komplexe Weiterentwicklung der Geräte erforderlich.

Das Fraunhofer ISE untersucht diese Fragestellungen bei der Entwicklung von Kompressions- und Sorptionsprozessen zum Einsatz in Wärmepumpen sowie zur Veredlung von Verbrennungs- oder Abwärme. In beiden Verfahren finden umweltfreundliche Kältemittel, wie fluoridierte, ungesättigte Kohlenwasserstoffe (HFOs), und natürliche Kältemittel wie Propan, Wasser oder Methanol Verwendung.

Neben der energetischen Optimierung des Kompressionskreises ist die Entwicklung von Sicherheitskonzepten eine zentrale Herausforderung, damit brennbare Kältemittel breiteren Einsatz finden können. In den Labors des Fraunhofer ISE werden Verfahren zur Leckage-Erkennung und -Vermeidung entwickelt. Wesentliche Bauteile werden im Hinblick auf die erforderlichen Füllmengen und die Nutzung mit teilweise völlig neuen Kältemitteln getestet und optimiert.

Die Entwicklung einer Propan-Wärmepumpe im von der EU geförderten Projekt »Green Heat Pump« stellte hierfür einen Meilenstein dar. Mit diesem, gemeinsam mit Partnern entwickelten Design konnte die erforderliche Kältemittelmenge von typischen 611 g/kW in Luft/Wasser-Wärmepumpen mit entsprechender Anlagenleistung auf 76 g/kW Heizleistung reduziert werden. Grundlagen dafür waren ein verändertes Design aller beteiligten Wärmeübertrager und des Ölsumpfs des Verdichters sowie die Verwendung des Arbeitsmittels Propan.

In Adsorptionsprozessen für Wärmepumpen und Kälteanlagen ist Wasser aufgrund seiner Stoffeigenschaften ein hervorragend geeignetes, umweltverträgliches Kältemittel. Die Entwicklung geeigneter Materialien, Wärmeübertrager und Anlagenkonzepte am Fraunhofer ISE ist die zentrale Fragestellung eines durch die Fraunhofer Zukunftsstiftung finanzierten Projekts. Die Entwicklungsergebnisse lassen in Zukunft thermisch getriebene Wärmepumpenmodule erwarten, die gegenüber dem derzeitigen Stand der Technik eine um den Faktor fünf erhöhte Leistungsdichte aufweisen, so dass wandhängende Gas-Wärmepumpen umsetzbar sein werden.

**1** *Laser-Doppler-Anemometrie-Messungen zur Analyse der räumlichen Geschwindigkeitsverteilung von ausströmendem Propan aus einer definierten Blendenöffnung. Die Untersuchungen zeigen die räumliche und zeitliche Kältemittelverteilung im Raum und unterstützen die Entwicklung von Sicherheitskonzepten.*

# WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN

1



**84**

Mitarbeitende

Im Geschäftsfeld »Wasserstofftechnologien« bieten wir FuE-Leistungen zur Erzeugung, Wandlung und Speicherung von Wasserstoff. Bei der elektrochemischen Wasserstofferzeugung liegt unser Schwerpunkt auf Fragestellungen zur Wasserspaltung durch Strom in Polymerelektrolyt-Membran-Elektrolyseuren (PEM). Wir betreiben multiphysikalische Simulationen und elektrochemische Charakterisierungen von Zellen und Stacks. Zudem konstruieren wir produktnahe Funktionsmuster vom Zellstapel bis hin zu vollautomatisierten Gesamtsystemen.

Wir entwickeln Brennstoffzellensysteme für reale Außenbedingungen, besonders für Fahrzeugtechnik und dezentrale stationäre Systeme. Unsere Arbeiten umfassen Entwicklung, Simulation und Charakterisierung von Einzelzellen, Zellstapeln und Systemen, ebenso wie das Testen von Peripherie- und Zellkomponenten unter extremen Klimabedingungen.



**12**

Zeitschriften- und Buchbeiträge

Wir besitzen langjährige verfahrens- und prozesstechnische Erfahrung mit der thermochemischen Prozessierung von fossilen und biogenen Energieträgern. Zu diesen Verfahren zählen Reformierung und Pyrolyse sowie Synthetisierung von Wasserstoff und CO<sub>2</sub> zu flüssigen Kraftstoffen. Wir entwickeln Verfahren, um nachhaltige flüssige Energieträger oder auch chemische Bausteine zu synthetisieren.



**13**

Vorträge und Konferenzbeiträge

Wasserelektrolyseure sind als dezentrale, regelbare Lasten eine zunehmend wertvolle Regelgröße für Stromnetzbetreiber, um Erzeugung und Verbrauch zeitnah anzupassen sowie darüber hinaus auch die Netzfrequenz zu stabilisieren. Als Kraftstoff in Brennstoffzellenfahrzeugen ist Wasserstoff das Bindeglied von der Energiewirtschaft zur emissionsfreien Mobilität.

1 Prüfanlage für die Vermessung von PEM-Elektrolyse-Stacks mit Stromstärken bis zu 4000 Ampere zur Erzeugung von Wasserstoff.

## Meilensteine 2017

- » Aufbau eines Brennstoffzellen-betriebenen Kommunalfahrzeugs.
- » Einspeiseanlage für regenerativ erzeugten Wasserstoff des Fraunhofer ISE ins Erdgasnetz der badenova in Freiburg eingerichtet.





[www.ise.fraunhofer.de/wasserstofftechnologien](http://www.ise.fraunhofer.de/wasserstofftechnologien)

---

## Ansprechpartner

### Koordination Geschäftsfeld

Dr. Christopher Hebling | Telefon +49 761 4588-5195  
[h2fc.hydrogen@ise.fraunhofer.de](mailto:h2fc.hydrogen@ise.fraunhofer.de)

### Thermochemische Prozesse

Dr. Achim Schaadt | Telefon +49 761 4588-5428  
[h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de](mailto:h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de)

### Wasserstofferzeugung durch Elektrolyse


Dr. Tom Smolinka | Telefon +49 761 4588-5212  
[h2fc.electrolysis@ise.fraunhofer.de](mailto:h2fc.electrolysis@ise.fraunhofer.de)

### Brennstoffzellensysteme


Dipl.-Ing. Ulf Groos | Telefon +49 761 45 88-5202  
[h2fc.systems@ise.fraunhofer.de](mailto:h2fc.systems@ise.fraunhofer.de)

---

## Ausgewählte Projekte 2017

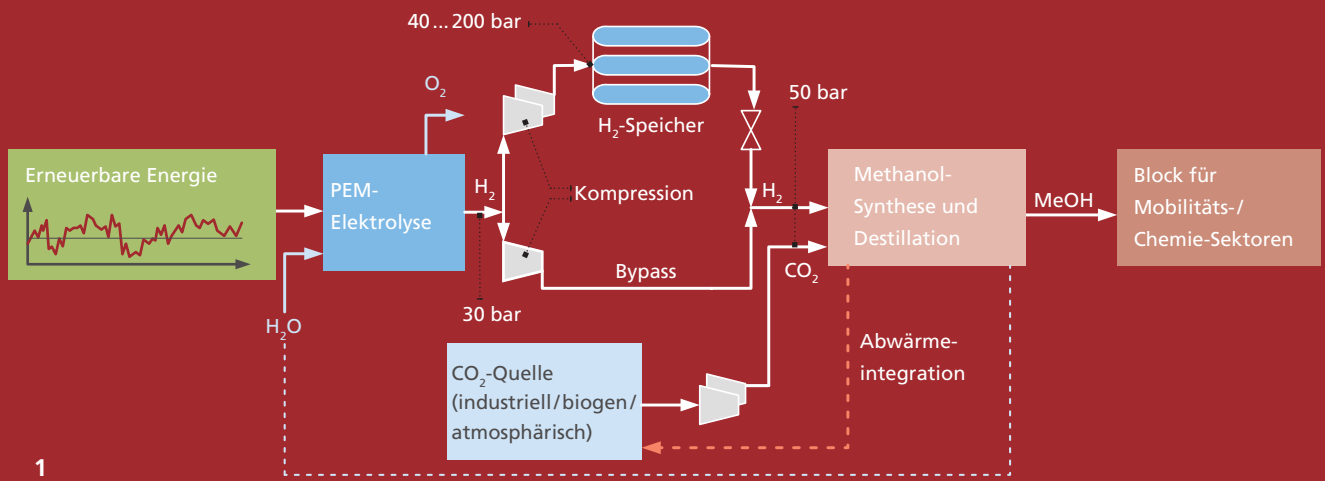
 SoHMUSDaSS – State-of-Health-Modellierung und Simulation sowie Diagnose an Brennstoffzellen, -stapeln und -systemen

 ELAAN – Elektrischer Antriebsstrang für Arbeits- und Nutzfahrzeuge

 AutoStack-CORE – Automotive Fuel Cell Stack Cluster Initiative for Europe II

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten:  
[www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/4-00](http://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/4-00)



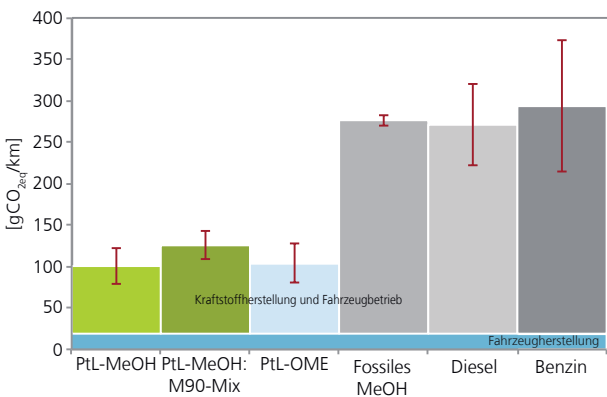


# Ökonomische und ökologische Evaluation von Power-to-Liquid-Prozessen

Christoph Hank | Telefon +49 761 4588-5335 | h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de

Die Synthese flüssiger Energieträger auf Basis von Kohlendioxid und erneuerbar produziertem Wasserstoff durch Elektrolyse (Power-to-Liquid, PtL) ist eine wichtige Komponente auf dem Weg hin zu einem nachhaltigen Energiesystem, das die Sektoren Energie, Mobilität und Industrie effizient vernetzt. Gleichzeitig vereint ein PtL-System mit seiner Vielzahl an möglichen Produkten wie Methanol (MeOH), Dimethylether (DME), Oxymethylenether (OME), etc. mehrere Nachhaltigkeitsaspekte. Dazu gehören z. B. die Wiederverwertung von CO<sub>2</sub> als ein wichtiger Baustein für die Schließung des Kohlenstoffkreislaufs, die Erzeugung erneuerbarer Energieträger mit hoher Energiedichte sowie die Produktion

nachhaltiger Plattformchemikalien (Power-to-Chemicals). Bei der Verwendung der PtL-Produkte im Verkehr ist die deutliche Reduktion der CO<sub>2</sub>-, NO<sub>x</sub>- und Feinstaub-Emissionen durch eine potenziell umweltfreundlichere Herstellung und verbesserte Verbrennungseigenschaften beim Einsatz als Kraftstoff ein weiterer Vorteil.

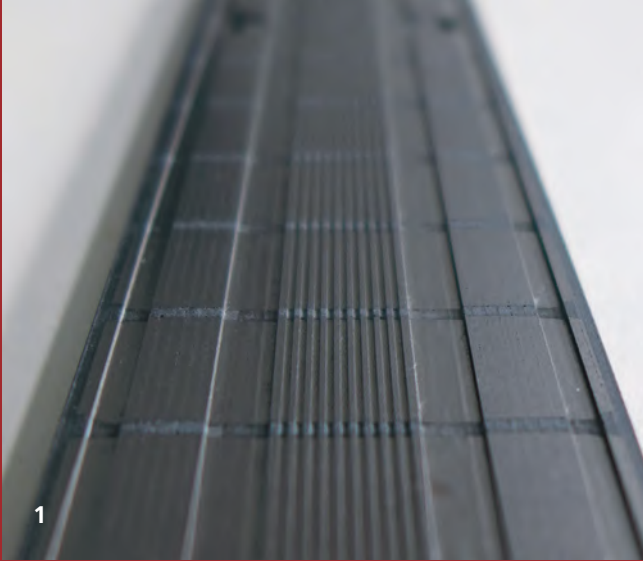


Grafik: CO<sub>2</sub>-Äquivalente-Emissionen pro km Fahrleistung verschiedener Kraftstoffe: PtL-Methanol und -OME aus Wind-IPV-Strommix und CO<sub>2</sub> aus Biogas, PtL-Methanol/Benzin-Mix (90Vol.-% MeOH), fossiles MeOH aus Synthesegas via Erdgas-Dampfreformierung, konventionelle Kraftstoffe; angegebene Schwankungsbreiten basieren auf den jeweils möglichen Produktionsszenarien bzw. den Abweichungen publizierter Studien.

Das Fraunhofer ISE bewertet den PtL-Prozess für verschiedene Anwendungsfälle im Hinblick auf seine Wirtschaftlichkeit und potenzielle Nachhaltigkeit. Für die Nachhaltigkeitsbewertung unterziehen wir den PtL-Prozess einer ganzheitlichen Lebenszyklusanalyse. Die Ergebnisse hieraus wurden beispielhaft für die Anwendung als Kraftstoff in Verbrennungsmotoren mit fossilen Benzin- und Dieselmotoren verglichen. Wir gehen von einem Well-to-Wheel-Ansatz aus und schließen die Fahrzeugproduktion in die Betrachtung ein. Es wurde deutlich, dass PtL-basierte Kraftstoffe deutlich weniger CO<sub>2</sub> emittieren. Ferner zeigte sich, dass besonders die Phase der Kraftstoffherstellung großen Einfluss auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck hat.

Für eine vollständige Systemanalyse ergänzen wir die Ergebnisse der LCA-Untersuchungen durch umfassende Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen. Dabei zeigte sich u. a., dass die Elektrolyse mit einer hohen Auslastung betrieben werden und eine hohe Energieeffizienz und Lebensdauer sowie eine möglichst hohe Materialeffizienz aufweisen sollte. Wir konnten zeigen, dass unter realistischen Annahmen die Gestehungskosten von PtL-MeOH in Deutschland von gegenwärtig 800 – 1700 €/t MeOH (entspricht 1,29 – 2,74 €/l Benzin-Äquivalent) auf zukünftig unter 550 €/t MeOH (< 0,89 €/l Benzin-Äquivalent) gesenkt werden. Berücksichtigt man auch Märkte außerhalb Deutschlands (z. B. Norwegen, Chile, etc.), so können noch deutlich geringere Herstellkosten erzielt werden. PtL-Prozesse können somit bei gleichzeitig vielversprechenden ökonomischen Perspektiven zukünftig einen signifikanten Beitrag zur Senkung der Treibhausgasemissionen leisten.

1 »Power-to-Liquid«: hier mit dem Zielprodukt nachhaltigen Methanols auf Basis erneuerbarer Energie, Wasser-Elektrolyse und abgeschiedenem CO<sub>2</sub>.

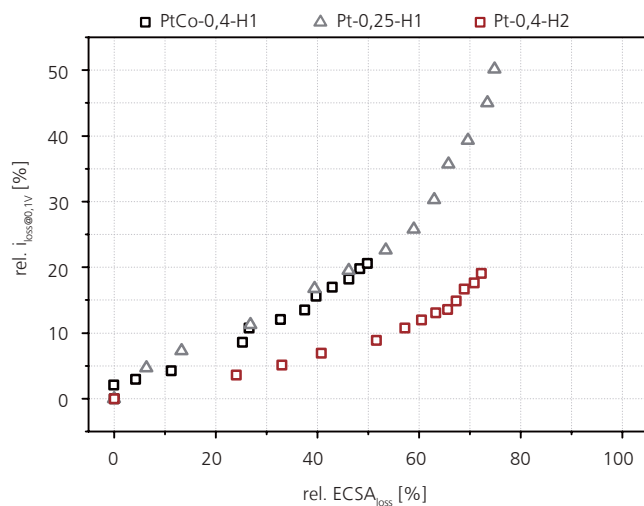


## Leistungs- und Alterungsverhalten von Brennstoffzellen-Komponenten

Dr. Robert Alink | Telefon +49 761 4588-5184 | h2fc.systems@ise.fraunhofer.de

Das Herzstück einer automobilen Brennstoffzelle ist die Membran-Elektroden-Einheit (membrane electrode assembly – MEA), an der die elektrochemische Energiewandlung von Wasserstoff und Luftsauerstoff zu Strom, Wärme und Feuchte stattfindet. Die MEA muss so gestaltet werden, dass die Reaktionsgase leicht an den Katalysator diffundieren können, die Elektronen sowie die Protonen effizient abgeleitet werden und das Produktwasser aus der porösen Lage schnell abtransportiert wird. Das Zusammenspiel dieser Prozesse bestimmt die Leistungsfähigkeit und Effizienz der Brennstoffzelle. Gleichzeitig gilt es, eine hohe Stabilität von Katalysator, Morphologie und Zusammensetzung der MEA zu erreichen, um eine minimale Alterung der Komponente zu gewährleisten.

Für die Bewertung unabhängig von spezifischen Zellgeometrien und Betriebsarten setzt das Fraunhofer ISE differenzielle Testzellen sowie international etablierte oder kundenspezifische Testprozeduren ein. Durch die Verwendung von differenziellen Testzellen werden homogene Betriebsbedingungen auf der gesamten aktiven Fläche hergestellt, so dass Variationen der Umgebungsbedingungen vernachlässigbar sind. Durch die Nutzung verschiedener elektrochemischer in situ Methoden wie Polarisationskennlinie, elektrochemische Impedanzspektroskopie, Zyklovoltammetrie, Linear Sweep Voltammetrie und Grenzstromdichtemessung, ist eine effiziente Analyse der Materialeigenschaften möglich. Dies erlaubt uns, den Einfluss von unterschiedlichen Elektrodenzusammensetzungen und Herstellverfahren z. B. auf die Alterung zu untersuchen (s. Grafik).



Grafik: Verlust an Grenzstromdichte bei 0,1 V Zellspannung  $i_{\text{loss@0,1V}}$  in Relation zum Verlust an elektrochemisch aktiver Oberfläche (ECSA) eines Platin (Pt) und Platin-Cobalt (PtCo) Katalysatorsystems. Die Verläufe für Beladungen von 0,4 und 0,25  $\text{mg}_{\text{Pt}}\text{cm}^{-2}$  und zwei Hersteller (H1/H2) zeigen Herstellungseinflüsse auf die Alterung.

Untersuchungen von Zellmaterialien unter realistischen Stöchiometrien und Betriebsbedingungen werden an unserer »along-the-channel«-Testzelle durchgeführt (Abb. 1). Darin können die realen Kanal-Steg-Querschnitte und die reale Kanallänge abgebildet werden. Durch eine Aufteilung in bis zu 50 Segmente können wir Stromprofile von Gasein- bis Gasauslass beobachten. Für tiefergehende Ursachenanalysen von Leistungsverlusten, die im Zusammenspiel der Materialien mit ortsabhängigen Betriebsbedingungen auftreten, kann simultan zur Stromdichtemessung Impedanzspektroskopie an allen Segmenten durchgeführt werden. Schließlich werden die Materialien im systemnahen Betrieb in großflächigen, automobilen Zellen oder Zellstapeln charakterisiert. So können wir die Ergebnisse in den vorgesehenen Zell- und Stackdesigns mit den systembedingten Betriebsparametern verifizieren.

1 »Along-the-channel«-Testzelle zur Charakterisierung von Brennstoffzellenkomponenten mit realistischen Kanal-Steg-Geometrien und Betriebsbedingungen.

2 Labor zur Charakterisierung von Brennstoffzellenkomponenten.

# ENERGIESYSTEMTECHNIK



Im Geschäftsfeld »Energiesystemtechnik« befasst sich das Fraunhofer ISE mit der Optimierung des Zusammenspiels der Gewinnung erneuerbarer Energie, Verbrauchern, Speichern und Stromnetzen. Damit die Energiewende insgesamt gelingen kann, stellt die Sektorenkopplung – z. B. im Verkehrssektor mit der Netzintegration der Elektromobilität – einen weiteren wichtigen Teil unserer Aktivitäten dar.

Die Leistungselektronik zählt heute zu den Schlüsseltechnologien, die entscheidend für den Umbau unserer Energieversorgung benötigt werden. Sie spielt bei der erneuerbaren Energieerzeugung, der Energiespeicherung, der dynamischen Netzregelung oder der Elektromobilität eine wichtige Rolle. Durch den Einsatz disruptiver Technologien, z. B. Leistungshalbleiter aus SiC oder GaN, entwickeln wir deutlich kleinere, effizientere und kostengünstigere Wechselrichter. Die Elektromobilität profitiert auch wesentlich davon in der Form von neuer Ladeinfrastruktur, von induktiven Energieübertragungssystemen sowie von kompakten und effizienten on-board Wandlern. Auch im Schienenverkehr und der Luftfahrt werden für den Einsatz CO<sub>2</sub>-ärmerer Techniken neue Leistungselektronikkomponenten benötigt.

Da das Stromnetz an vielen Stellen an die Grenze seiner Belastbarkeit gelangt, arbeiten wir an einer verbesserten Netzintegration von Energieanlagen. Der sogenannte »netzdienliche Betrieb« von dezentralen Anlagen beruht sowohl auf der Einhaltung geforderter Richtlinien sowie auf einer optimalen Integration der Anlagen in den Energiemarkt. Dafür liefern unsere Modelle im Bereich der Energiesystemanalyse techno-ökonomisch optimale Transformationspfade für die Energiewende, sowohl auf Quartiersebene als auch im regionalen und transnationalen Kontext. Da die Energielandschaft sich zunehmend digitalisiert, liegt ein weiterer, wichtiger Fokus unserer Aktivitäten auf Informations- und Kommunikationstechnologien.



**192**

Mitarbeitende



**21**

Zeitschriften- und Buchbeiträge



**52**

Vorträge und Konferenzbeiträge



**1**

Neu erteiltes Patent

1 *Photovoltaik und Windenergie, die zwei Säulen unserer künftigen Energieversorgung.*

© hfizimages/Shutterstock

## Meilensteine 2017

- » Im »C/sells« Projekt (BMW gefördert) erforschen wir mit vielen Partnern das Smart Grid der Zukunft.
- » Die »REMod-D Transformationsstudien« zeigen kostenoptimierte Pfade zu einem auf erneuerbaren Energien basierendem Versorgungssystem in Deutschland.
- » Im Projekt »NETfficient« (EU gefördert) wurde ein höchst kompakter Wechselrichter mit 1000 kW in einem IT-Rack realisiert.
- » Hochintegriertes Konzept bei PV-Wechselrichtern verspricht Kostensenkung.



[www.ise.fraunhofer.de/energiesystemtechnik](http://www.ise.fraunhofer.de/energiesystemtechnik)

---

## Ansprechpartner

### Koordination Geschäftsfeld

Dr. Olivier Stalter | Telefon +49 761 4588-5467  
[energysystem@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem@ise.fraunhofer.de)

### Leistungselektronik

Dr. Olivier Stalter | Telefon +49 761 4588-5467  
[energysystem.power@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem.power@ise.fraunhofer.de)

### IKT für Energiesysteme

Prof. Dr. Christof Wittwer | Telefon +49 761 4588-5115  
[energysystem.ict@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem.ict@ise.fraunhofer.de)

### Systemintegration – Strom, Wärme, Gas

Dipl.-Ing. Sebastian Herkel | Telefon +49 761 4588-5117  
[energysystem.integration@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem.integration@ise.fraunhofer.de)

### Batteriesysteme für stationäre und mobile Anwendungen

Dr. Matthias Vetter | Telefon +49 761 4588-5600  
[energysystem.batteries@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem.batteries@ise.fraunhofer.de)


### Energiesystemanalyse


Dr. Thomas Schlegl | Telefon +49 761 4588-5473  
[energysystem.analysis@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem.analysis@ise.fraunhofer.de)


---

## Ausgewählte Projekte 2017


 JOSPEL – Effizientes Passagier-Komfortsystem basierend auf dem Joule- und Peltier-Effekt


 iDistributedPV – Photovoltaik im Verteilnetz: Smart-Grid-Lösungen für dezentrale Stromerzeugung mit Photovoltaik, Stromspeicher und Nachfragerregelung


 Kopernikus-Projekt ENavi – Systemintegration


 MENA CSP KIP – Middle East and North Africa Concentrating Solar Power Knowledge and Innovation Program

 C/sells – Das Schaufenster für intelligente Energieversorgung

 FlexGeber – Demonstration von Flexibilitätsoptionen im Gebäudesektor und deren Interaktion mit dem Energiesystem Deutschlands

 SPEISI – Sicherheit und Zuverlässigkeit von PV-Anlagen mit Speichersystemen unter besonderer Berücksichtigung von Brandrisiken und Löschrategien

 ELAAN – Elektrischer Antriebsstrang für Arbeits- und Nutzfahrzeuge

 synGHD – Synthetische Lastprofile für eine effiziente Versorgungsplanung für Nicht-Wohngebäude

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten:  
[www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/5-00](http://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/5-00)





## Leistungselektronik und Netztechnologien im Multi-MW-Bereich

Dr. Olivier Stalter | Telefon +49 761 4588-5467 | [energysystem.power@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem.power@ise.fraunhofer.de)

Mit dem Aus- und Umbau der Stromnetze für die Energiewende wachsen auch die Anwendungsfelder für Leistungselektronik und Netztechnologien. Leistungselektronische Wandler sind zentrale Elemente bei der Anbindung von Erzeugern, Verbrauchern sowie Speichern und spielen eine wachsende Rolle für die Netzregelung. Um das Energiesystem der Zukunft flexibel und zuverlässig zu betreiben, müssen sie auf immer komplexere Anforderungen zugeschnitten sein. Vor diesem Hintergrund wird am Fraunhofer ISE ein neuer Laborstandort realisiert, in dem Forschung, Entwicklung und Tests im Hinblick auf die Netzintegration sowie die Regelung von Nieder-, Mittel- und Hochspannungsnetzen durch Wechselrichter betrieben werden. Ein wesentlicher Teil der anspruchsvollen Infrastruktur wurde bereits hergestellt und installiert. Die komplette Inbetriebnahme soll Mitte 2018 erfolgen.

Die Aktivitäten des Fraunhofer ISE auf dem Gebiet der Leistungselektronik und Netztechnologien sind mit den Herausforderungen der Energiewende gewachsen. Bereits seit vielen Jahren werden in unserem akkreditierten »TestLab Power Electronics« Stromrichter aller Arten mit einer Leistung von bis zu einem Megawatt getestet. Wir untersuchen die Geräte dort hinsichtlich ihres Wirkungsgrads oder der Einhaltung von Netzanschlussbedingungen. Mit dem Laborneubau geht das Fraunhofer ISE einen weiteren Schritt und bietet seine

Dienstleistungen zukünftig auch für Geräte und Komponenten im Multi-Megawatt-Bereich sowie für Anwendungen in der Mittelspannung an. Darüber hinaus spielen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten eine genauso wichtige Rolle. Ein ganz besonderer Fokus liegt dabei auf der Entwicklung von Leistungselektronik für:

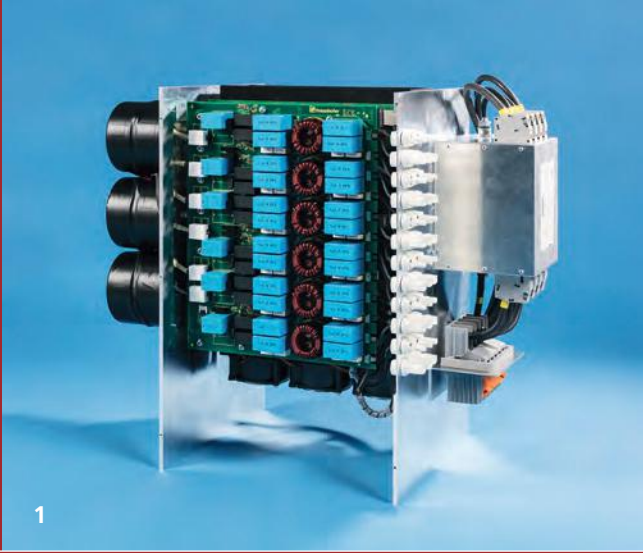
- » Neuartige PV-Großkraftwerke
- » On- und off-shore Windkraftanlagen
- » Zentrale und dezentrale Energiespeichersysteme
- » Zukunftsfähige AC- und DC-Netze
- » Mikro-Grid Anwendungen
- » Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität
- » Mobile Anwendungen wie Züge, Schiffe und Flugzeuge

Zudem arbeiten wir an neuen Regelungsalgorithmen. Im Mittelpunkt stehen besonders Dynamik und Resilienz der Energiewandler. Konkrete Problemstellungen sind z. B. die Interaktionen zwischen parallel arbeitenden Wechselrichtern, die gleichzeitige Regelung von verschiedenen Netzebenen, das Fehlermanagement in komplexen Netzstrukturen sowie die Steuerung autarker Netzzellen oder netzferner Systeme. Auch die Integration der Leistungselektronik in eine zunehmend digitale Welt wird eine zentrale Aufgabe sein.

Um Entwicklungen parallel vorantreiben zu können, werden im Mittel- und Niederspannungsbereich mehrere Schaltanlagen, Teststände sowie Prüffelder aufgebaut. Der neue Standort wird in seiner Ausrichtung und Ausstattung damit einzigartig. Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) mit insgesamt rund 10 Mio. Euro gefördert, das Fraunhofer ISE investiert weitere 5 Mio. Euro.

**1** Bereits installierter 110 kV/20 kV/40 MVA Transformator zur Anbindung der Multi-Megawatt-Anlage an das Hochspannungsnetz.

**2** Modell des künftigen »Zentrum für Leistungselektronik und Nachhaltige Netze« in der Zinkmattenstraße, Freiburg: Hauptgebäude (links) und Labor (rechts).



## Aufbau- und Kühlungstechnik

Stephan Liese | Telefon +49761 4588-5890  
energysystem.power@ise.fraunhofer.de

Um dem stetig steigenden Kostendruck einer globalisierten PV-Wirtschaft zu begegnen, sind neue Forschungsansätze erforderlich. Dabei ist die Aufbau- und Kühlungstechnik innerhalb leistungselektronischer Schaltungen – wie in PV-Wechselrichtern – ein zentraler Faktor für Kostenoptimierungen. Mechanische und elektromechanische Komponenten von Leistungselektroniken haben bei Markt verfügbaren Geräten einen Materialkostenanteil von bis zu 70 %.

Um diesen Anteil signifikant zu reduzieren, sind neue Aufbaukonzepte und Kühlungstechniken erforderlich, die vor allem Material sparen und dabei Wirkungsgrad und Zuverlässigkeit nicht beeinträchtigen. So können z. B. Stützstrukturen und Gehäuse durch robuste und teilweise leitfähige Verbundwerkstoffe in 3D-Bauweise entwickelt werden. Mit einer zusätzlichen Entkopplung von Gehäuse und Kühlkörper werden unterschiedliche Temperaturniveaus im Gerät erreicht.

Der Einsatz von Temperaturzonen mit unterschiedlichen Kühlungsarten ermöglicht gleichzeitig die Verwendung von kostengünstigeren Bauteilen mit geringeren maximalen Betriebstemperaturen und die Erhöhung der Kühlkörpertemperatur zur besseren Ausnutzung der Leistungshalbleiter.

Bei unseren diesbezüglichen Forschungsarbeiten ist es uns gelungen, das Leistungsgewicht gegenüber kommerziellen Geräten um knapp 30 % zu erhöhen und so Material einzusparen.

**1** *Technologiedemonstrator eines 70 kVA PV-Wechselrichters mit optimierter Aufbau- und Kühlungstechnik.*

## Wechselrichter im Stromnetz

Sönke Rogalla | Telefon +49 761 4588-5454  
energysystem.power@ise.fraunhofer.de

Ein stabiler Betrieb von Stromnetzen ist zunehmend abhängig von den eingesetzten Wechselrichtern und deren Interaktion mit dem Netz. Schon heute sind in Deutschland Wechselrichter mit einer Leistung von insgesamt ca. 80 GW in Wind- und PV-Anlagen installiert. Stationen für Hochspannungs-Gleichstrom-Übertragung (HGÜ), Batteriespeicher und E-Fahrzeuge sowie Elektrolyseure und Wärmepumpen werden ebenfalls per Leistungselektronik an das Stromnetz angeschlossen. Bis 2050 wird in Deutschland eine installierte Wechselrichterleistung von über 500 GW erwartet. Die Anforderungen an die Geräte steigen damit in mehrfacher Hinsicht.

Um die netzbildenden Eigenschaften der wegfallenden konventionellen Kraftwerke zu kompensieren, müssen Wechselrichter künftig statt einer netzspeisenden, eine netzerhaltende Betriebsweise besitzen. Mit diesem Ziel entwickelt und erprobt das Fraunhofer ISE neue Regelungsalgorithmen für Wechselrichter in den vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstützten Forschungsprojekten »Zukunftskraftwerk PV« und »VerbundnetzStabil«.

Netze mit hohem Wechselrichteranteil, z. B. in großen PV-Anlagen, neigen zur Ausbildung unerwünschter Oszillationen, die zu Betriebsstörungen oder Anlagenzerstörungen führen können. Das Fraunhofer ISE untersucht derartige Spannungsprobleme im Feld und Labor und entwickelt neue Charakterisierungsverfahren zur Stabilitätsbewertung von Wechselrichtern am Netz. Durch anlagenseitige Maßnahmen oder Optimierung der Wechselrichterregelung sollen Instabilitäten zuverlässig vermieden werden.

**2** *Messung von Oberschwingungsströmen an einem Mittelspannungstransformator in einem PV-Kraftwerk.*



1



2

## Digitale Methoden und Werkzeuge für Gebäude und Netze der Zukunft

Nicolas Réhault | Telefon +49 761 4588-5352  
 Dr. Robert Kohrs | Telefon +49 761 4588-5708  
 energysystem.ict@ise.fraunhofer.de

Die fortschreitende Digitalisierung schafft neue Möglichkeiten, die Energieeffizienz von Gebäuden und und zugleich die Auslastung der Stromnetze deutlich zu steigern. Durch die elektronische Erhebung von Daten aus dem Gebäudebetrieb und deren automatisierte Auswertung gewinnen Gebäudebetreiber neue Erkenntnisse, um bisher unzugängliche Energieeinsparpotenziale zu erschließen. Mit modernen Diagnoseverfahren können z. B. Probleme im Betrieb von Gebäuden automatisch und frühzeitig erkannt und behoben werden, bevor Komfortdefizite oder Energieverluste entstehen. Wir nutzen dabei die Methoden des »Building Information Modeling (BIM)« auch für den optimierten Betrieb von Gebäuden. Facility-Management-Aufgaben, wie Wartungen, können durch kontextuelle Informationen aus BIM stark unterstützt werden.

Eine vorrangig dezentrale, fluktuierende Stromerzeugung verändert den Netzbetrieb fundamental, da die Steuerung der Verbrauchsseite immer wichtiger wird. Moderne Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) ermöglicht die Vernetzung dezentraler Erzeuger, der Gebäudeautomation und des Stromnetzbetriebs. Die Erschließung von Flexibilitäten auf der Verbraucherseite ist dabei die Grundlage verschiedener neuer Geschäftsmodelle.

Die Expertise des Fraunhofer ISE im Geschäftsfeldthema »IKT für Gebäude und Energiesysteme« reicht vom Monitoring über die Entwicklung von automatisierten Analyseverfahren, von sicheren und interoperablen Kommunikationsprotokollen sowie modellprädiktiven Steuerungsalgorithmen, über die Nutzung von BIM bis hin zur Marktintegration.

1 Kältemaschine mit autarker Mess-, Steuer- und Regelungstechnik.

## Netzdienlicher Betrieb von KWK-Anlagen

Dr. Bernhard Wille-Hausmann | Telefon +49 761 4588-5443  
 sys.smartgrid@ise.fraunhofer.de

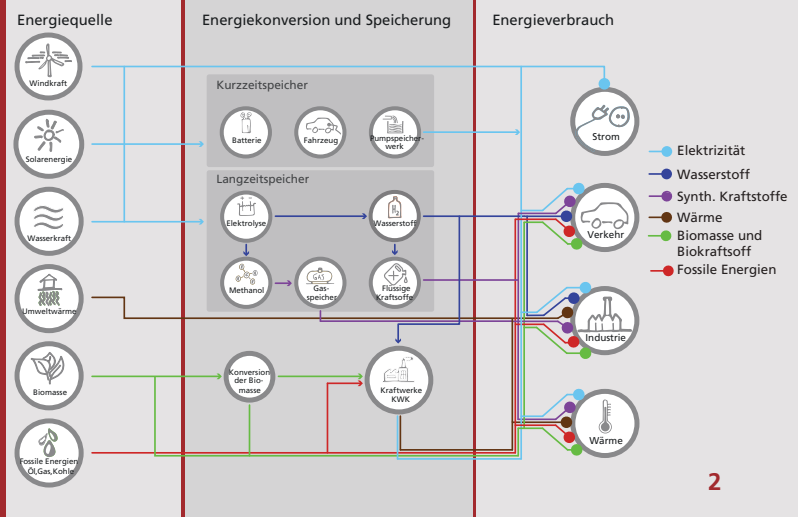
Durch den intensiven Zubau von PV-Anlagen geraten Stromnetze immer häufiger an die Grenze ihrer Aufnahmefähigkeit, wodurch es zu Überspannungen kommt. Der Zubau stromerzeugender Einheiten mit Kraft-Wärme-Kopplung (KWK) ist dadurch ohne zusätzlichen kostenintensiven Netzausbau oft nicht mehr möglich. Sektorenübergreifendes Energiemanagement, bei dem elektrische Energie aus dem Netz zur Wärmeenergie genutzt wird, ist ein sinnvoller Lösungsansatz.

Der netzdienliche Regler des Fraunhofer ISE berechnet aus einer lokalen Spannungsmessung den Netzzustand und ermittelt die geeignete Leistungsvorgabe für das Heizsystem. Ziel ist die Stabilisierung des Spannungszustands des Netzes, also wird bei niedriger Spannung die KWK-Anlage zur Wärmebereitstellung aktiviert, bei hoher Spannung entsprechend die elektrische Heizung. Die Parametrierung des netzdienlichen Reglers erfolgt durch die bekannten Nennleistungen der vor Ort installierten thermischen Einheiten. Die spezifische Sensitivität des Netzanschlusspunkts wird durch die Erfassung der Netzimpedanz im Betrieb automatisch ermittelt und ebenfalls für die Regelungsparametrierung verwendet.

Der Einsatz wurde im »Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze« des Fraunhofer ISE mit »Hardware-in-the-Loop«-Tests erprobt. Dabei wurde deutlich, dass durch den KWK-Regler die gesetzlichen Spannungsgrenzen im Stromnetz auch ohne Netzausbau eingehalten wurden. Das Potenzial für derartige Betriebsregelungssysteme ist sehr groß. Sie ermöglichen hocheffiziente lokale Energieversorgung mit dezentralen Erzeugern bei hoher Spannungsqualität in bestehenden Niederspannungsnetzen.

2 »Hardware-in-the-Loop«-Simulationen.





2

## Berechnung nachhaltiger lokaler Energiesysteme mit »KomMod«

Gerhard Stryi-Hipp | Telefon +49 761 4588-5686  
 energysystem@ise.fraunhofer.de

Immer mehr Kommunen und Eigner großer Liegenschaften verfolgen das Ziel, ihre Energieversorgung langfristig klimaneutral zu gestalten. Sie benötigen Unterstützung dabei, die dafür optimale Energiesystemstruktur zu ermitteln. Das Fraunhofer ISE hat hierfür das »Kommunale Energiesystemmodell KomMod« entwickelt, mit dem lokale Energiesysteme zeitlich hochaufgelöst und sektorgekoppelt optimiert werden können.

»KomMod« wurde bislang in 15 Projekten in Deutschland, der EU und Asien eingesetzt. Für die Stadt Kaiserslautern haben wir beispielsweise berechnet, dass 45 % des Strombedarfs mit erneuerbaren Energien vor Ort erzeugt werden können, wobei die Photovoltaik mit 33 % dominiert. Die Wärme wird zu 11 % mit Solarwärme, zu 13 % mit Biomasse und zu 76 % mit Strom erzeugt. 250 MWh Stromspeicher puffern die Spitzen ab.

Für den Flughafen Stuttgart wurde der Beitrag ermittelt, den dieser zur Erreichung der Klimaschutzziele des Landes Baden-Württemberg im Jahr 2050 leisten kann. Die PV ist die dominante lokale Energiequelle und deckt 37 % des Strombedarfs, inklusive des Bedarfs für die Elektromobile der Fluggäste.

Für die chinesische Industriestadt Xiuzhou / Jiaying hat das Fraunhofer ISE berechnet, dass im Jahr 2030 unter Ausnutzung von 80 % der lokalen erneuerbaren Energien-Ressourcen 33 % des Energiebedarfs gedeckt werden können. Und im Auftrag von Toyota wurde festgestellt, mit welchen Energiesystemen das Unternehmensziel der CO<sub>2</sub>-neutralen Autoproduktion in den acht europäischen Fabriken erreicht werden kann.

1 Für die Stadt Kaiserslautern wurde berechnet, wie eine klimaneutrale Energieversorgung erreicht werden kann. © Stadt Kaiserslautern

## Daten und Modelle für die Energiesystemanalyse

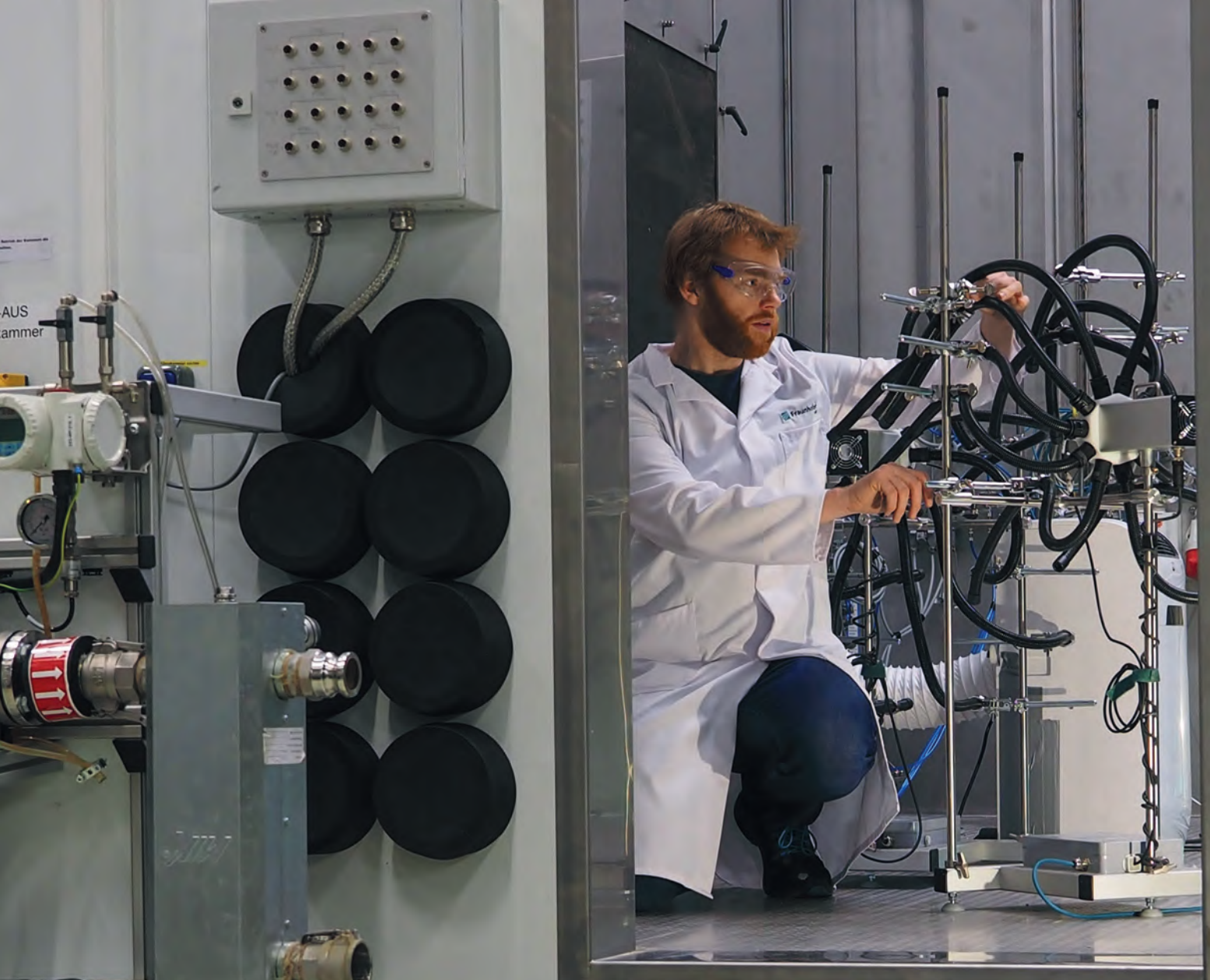
Dr. Thomas Schlegl | Telefon +49 761 4588-5473  
 energysystem.analysis@ise.fraunhofer.de

Viele Unternehmen sowohl in Deutschland als auch weltweit beschäftigen sich mit Fragen wie:

- » Wo liegen optimale Standorte für Erneuerbare Energien Kraftwerke?
- » Wie können diese Kraftwerke optimal in das Energiesystem integriert werden?
- » Welche konventionellen Kraftwerke sollen (zudem) betrieben werden?
- » Reichen die bestehenden Leitungskapazitäten aus, um eine sichere Energieversorgung zu gewährleisten?
- » Wie günstig müssen Energietechnologien (z. B. Wärmepumpen, Elektrofahrzeuge) werden, damit sie am Markt erfolgreich sind?
- » Was kostet der Umbau einer Energieversorgung?

Das Fraunhofer ISE arbeitet intensiv an Methoden und Werkzeugen zur Beantwortung derartiger Fragestellungen. Anhand einer detaillierten Abbildung aller Verbrauchssektoren im intersektoralen Energiesystemmodell »REMod-D« und der integralen Optimierung von Kraftwerkskapazitäten, Stromleitungen und regionalen Gegebenheiten in »ENTIGRIS« können wir die Fragen unserer Kunden umfassend und spezifisch beantworten. Wir verfügen zudem über eine umfassende Datenbasis zu Energietechnologien und Regularien in Deutschland und vielen anderen Ländern in Europa und weltweit. In Deutschland und international wurden erfolgreich Projekte – z. B. zu Standortfragen von Erneuerbare Energien Kraftwerken – umgesetzt und Technologiehersteller bei strategischen Entscheidungen hinsichtlich des Technologieportfolios beraten.

2 Schlüsselfaktoren und -technologien in einem auf Erneuerbaren basierenden Energiesystem 2050. (Bildquelle: Kooperation mit BMW AG)



# AKKREDITIERTE LABORS

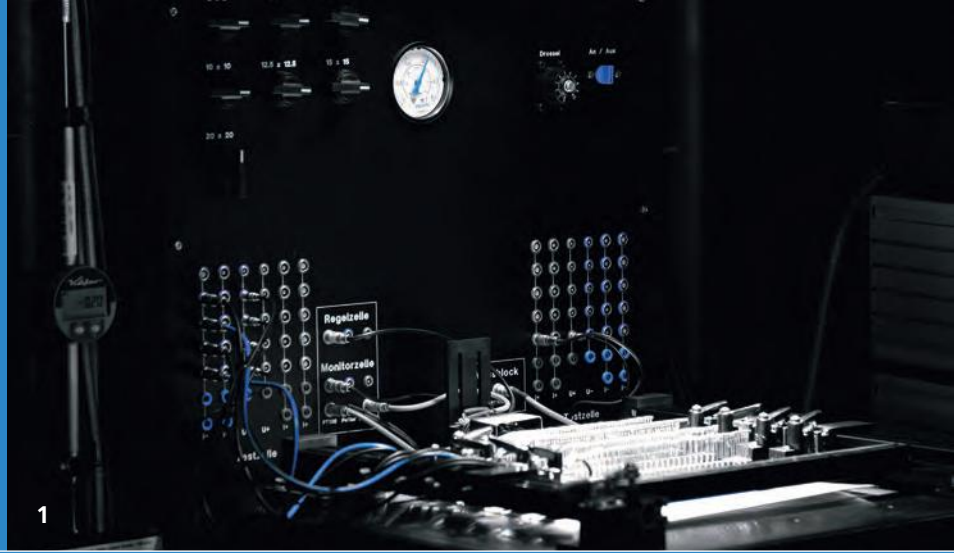
In Ergänzung zu seinen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bietet das Fraunhofer ISE Unternehmen und Forschungseinrichtungen verschiedene Prüf- und Zertifizierungsverfahren an. Derzeit verfügt das Institut über zwei Kalibrier- und fünf Testeinrichtungen mit Akkreditierung:

- » Callab PV Cells
- » Callab PV Modules
- » TestLab PV Modules
- » TestLab Solar Façades
- » TestLab Solar Thermal Systems
- » TestLab Power Electronics
- » TestLab Heat Pumps and Chillers

Seit Februar 2018 ist unser TestLab Heat Pumps and Chillers akkreditiert. Es bietet neueste Technik zur Vermessung und Charakterisierung von Wärmepumpen und Kältemaschinen sowie deren Komponenten.



*Vermessung von Wärmepumpen und Kältemaschinen in der kalorimetrischen Klimakammer des Fraunhofer ISE.*



## Kalibrierung von Solarzellen

cells@callab.de

Callab  
PV Cells



Das Callab PV Cells des Fraunhofer ISE bietet die Kalibrierung / Messung von Solarzellen verschiedenster PV-Technologien an und arbeitet national sowie international mit Firmen und Instituten an der Entwicklung präziser Messungen für neue Technologien. Es zählt zu den weltweit führenden PV-Kalibrierlabors und ist Referenz für Forschung und Industrie. Solarzellenhersteller lassen ihre Referenzsolarzellen für die Produktion nach internationalen Standards bei uns kalibrieren.

Das Callab PV Cells ist als Labor für die Solarzellenkalibrierung bei der Deutschen Akkreditierungsstelle DAkkS akkreditiert. In Kooperation mit PV-Herstellern und mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) arbeiten wir an der kontinuierlichen Verbesserung der Messunsicherheiten und der Entwicklung neuer Messverfahren. So spielt z. B. die Veränderung der Solarzellenparameter bei unterschiedlichen Einfallswinkeln eine wichtige Rolle für den Ertrag im praktischen Einsatz. Ein neues Verfahren, das es uns erlaubt, das Winkelverhalten mit spektraler Auflösung zu bestimmen, wurde 2017 eingeführt. Des Weiteren wurden neue Messverfahren und Messplätze zur schnelleren bzw. genaueren Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit entwickelt.

Um die Vergleichbarkeit von verschiedenen Solarzellentechnologien zu gewährleisten, entwickeln wir Messverfahren für neuartige Solarzellen. Dabei stellen neue Metallisierungsstrukturen bei Wafersolarzellen sowie neue Materialkombinationen der Absorber, wie bei Perowskitsolarzellen, und die Messung bifazialer Solarzellen wesentliche Punkte unserer Weiterentwicklung dar. Verschiedene Mehrlichtquellensimulatoren ermöglichen Messungen unter nahezu beliebigen Normbedingungen, wie für Weltraum- und für Konzentratoranwendungen. Mit unserem spektral anpassbaren Blitzlichtsimulator können Mehrfachzellen mit bis zu 4 pn-Übergängen unter angepasstem Simulatorspektrum unter Konzentration vermessen werden. Zusätzlich unterstützen wir die Normentwicklung der Arbeitsgruppen WG2 und WG7 des technischen Komitees TC82 der IEC im Bereich der konzentrierenden und nicht-konzentrierenden Photovoltaik.

*Silicium-, Dünnschicht-, Perowskit-, Organische Solarzellen*  
Dr. Jochen Hohl-Ebinger  
Telefon +49 761 4588-5359

*Silicium-, Dünnschicht-, Perowskit-, Organische Solarzellen*  
Wendy Schneider  
Telefon +49 761 4588-5146

*Mehrfach- und Konzentratorzellen*  
Dr. Gerald Siefer  
Telefon +49 761 4588-5433

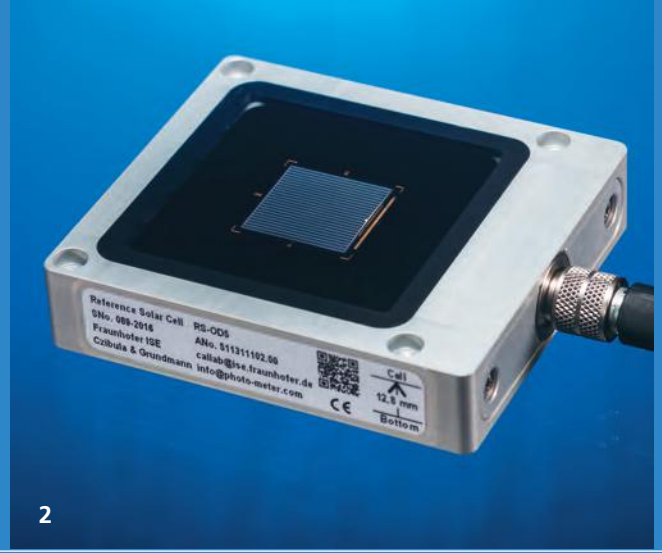
### Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung als Kalibrierlabor nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » AM1.5g (IEC 60904-3)
- » AM0 (ISO 15387)
- » AM1.5d (ASTM G173-03)

1 Konstant-Sonnensimulator im Callab PV Cells.



1



2

## Kalibrierung von PV-Modulen

modules@callab.de

Callab  
PV Modules



Das akkreditierte Kalibrierlabor hat eine neue Bestmarke erreicht: Photovoltaikmodule können jetzt mit nur 1,3 % Messunsicherheit kalibriert werden. Die Messgenauigkeit wurde durch die Deutsche Akkreditierungsstelle bestätigt. Der neueste Rundvergleich mit NREL, AIST und JRC zeigt Abweichungen kleiner als 0,9 % für die Leistungswerte bei kristallinen Modulen. Auf Basis unserer international führenden Messgenauigkeit bieten wir Unterstützung von der präzisen Kalibrierung einzelner Zellen und Module bis hin zu komplexen, kundenspezifischen Aufträgen, z. B. der Kalibrierung bifazialer Module.

Die hohe Messgenauigkeit ist vor allem für Modulhersteller entscheidend. Mit präziseren Referenzmodulen können die Messunsicherheiten in der Modulproduktion verringert und die Leistungsangaben im Datenblatt mit geringerer Toleranz ausgewiesen werden. Wir bieten auch präzise kalibrierte Referenzzellen aus eigener Entwicklung für verschiedene Anwendungen.

Über unser Qualitäts-Benchmarking unterstützen wir mit individuellen Prüfverfahren sowohl die Auswahl von Modullieferanten für große PV-Projekte als auch die Qualitätssicherung beim Einkauf großer Modulchargen. Stichprobenanalysen von Modulen aus dem Feld liefern Betreibern und Investoren von PV-Kraftwerken jetzt noch genauere Aussagen über die tatsächliche Leistung ihrer Module. Auch bei Schadensfällen können unsere unabhängigen Messungen helfen, Abweichungen zur Leistungsgarantie präziser zu ermitteln.

Für die präzise Langzeitcharakterisierung von PV-Modulen bieten wir ein Modulmonitoringsystem aus eigener Entwicklung zum Betrieb beim Kunden an. Das Messsystem erfasst hochaufgelöste DC-Messdaten (I-U-Kurven) von Einzelmodulen. Das ermöglicht die umfassende Charakterisierung der Module im Betrieb hinsichtlich ihrer Ertragseigenschaften für neue Technologien wie bspw. bifaziale Module.

Die Leistung von Konzentrator-PV (CPV) Modulen unter Standardbedingungen können wir an mehreren Außentestständen mit Nachführeinheiten sowie an einem Sonnensimulator in unserem Labor messen.

Dipl.-Ing. (FH) Frank Neuberger  
Telefon +49 761 4588-5280  
Mobil +49 170 9247193

### Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung als Kalibrierlabor nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » Kalibrierung von PV-Modulen mit einer Messunsicherheit von nur 1,3 %
- » Bestimmung der spektralen Empfindlichkeit auf Modul- und Zellebene von 300 nm bis 1200 nm
- » Präzisionsmessung gemäß IEC 60904-3 mit einer Messunsicherheit von nur 1,5 %
- » Power Rating Messungen gemäß IEC 61853
- » Bewertung von CPV-Modulen bei CSOC und CSTC
- » IEC 62670-3 für CPV-Module

1 *Bifaziales PV-Modul.*

2 *Referenzzelle für Outdoor-Anwendung.*



## Qualitätssicherung von PV-Modulen

tlpv@ise.fraunhofer.de | www.testlab-pv-modules.de

**TestLab**  
PV Modules



Das TestLab PV Modules bietet seit 2006 ein breites Spektrum an Qualitäts- und Zuverlässigkeitsprüfungen an. In unserem akkreditierten Labor betreiben wir modernste und innovative Prüfanlagen, deren Anwendungsbereich deutlich über die Standardprüfungen hinausgeht.

Wir beraten unsere Kunden bei der Definition von kosten- und zeiteffizienten Prüfprogrammen und individuellen Qualitätskriterien. Die Prüfungen dienen dazu, potenzielle Schwachstellen von Modulen aufzuspüren, verschiedene Modultypen im Benchmarking zu vergleichen oder spezielle Modultechnologien für besondere Einsatzbedingungen zu qualifizieren.

Mithilfe innovativer und modernster Analysemethoden untersuchen wir Fehlerbilder wie Schneckenspuren und Potenzialinduzierte Degradation (PID) systematisch. Das TestLab PV Modules bietet für viele typische Fehlerbilder zielgerichtete Prüfungen und Prüfsequenzen an.

Unsere Plattformen liefern genaueste Messwerte und präzise reproduzierbare Versuchsdurchführungen für eine umfassende Charakterisierung. Die hochpräzisen Leistungsmessungen werden in unserem akkreditierten Kalibrierlabor CalLab PV Modules mit einer weltweit führenden Messunsicherheit von nur 1,3 % durchgeführt.

In Kooperation mit dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut führen wir Zertifizierungen entsprechend internationaler Qualitäts- und Sicherheitsstandards durch. Zudem haben wir das Qualitätszertifikat »VDE Quality Tested« entwickelt, das eine laufende Qualitätssicherung der Modulproduktion von unabhängiger Seite auf hohem Niveau ermöglicht.

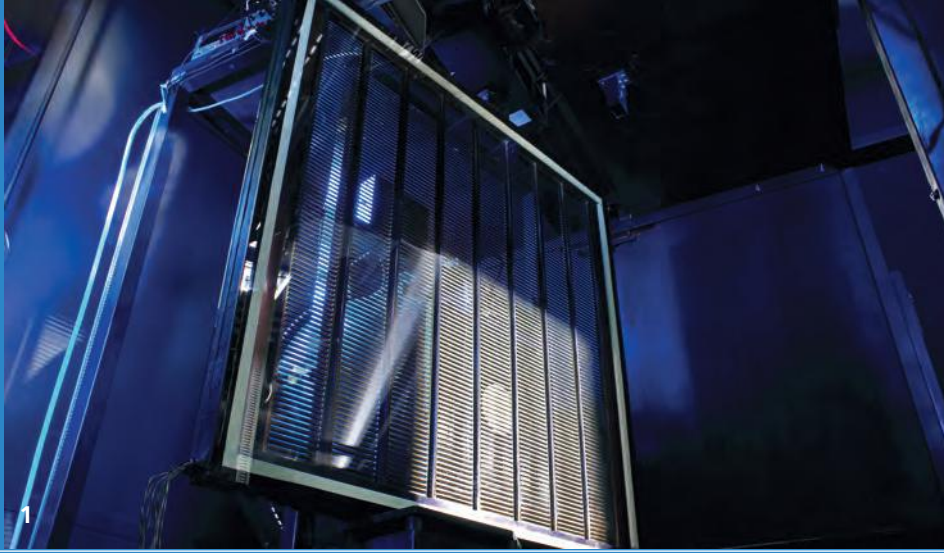
Wir bieten modellbasierte Langzeitstabilitätstests an, die die besonderen klimatischen Herausforderungen in Wüsten oder an tropischen Standorten berücksichtigen, um PV-Module und Komponenten für den Einsatz in diesen Gebieten zu qualifizieren.

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Philipp  
Telefon +49 761 4588-5414

### Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach  
DIN EN ISO / IEC 17025
- » IEC 61215-1:2016 PV-Module –  
Bauarteignung und -zulassung  
(Teil 1: Prüfanforderungen)
- » IEC61215-2:2016 Teil 2: Prüfverfahren
- » UL 1703 Standard for Flat-Plate PV  
Modules and Panels
- » IEC 61730-1:2016 PV-Module –  
Sicherheitsqualifikation (Teil 1:  
Anforderungen an den Aufbau)
- » IEC61730-2:2016 (Teil 2:  
Anforderungen an die Prüfung)
- » IEC 61701:2011 Salznebeltest
- » IEC TS 62804-1:2015 PV Module –  
Testmethode für PID (potenzial-  
induzierte Degradation)
- » Sandabrasionstest

**1** Module werden im TestLab PV Modules auf Sicherheit, Zuverlässigkeit und Qualität geprüft.



## Charakterisierung von Fassaden und Bauteilen

testlab-solarfacades@ise.fraunhofer.de

**TestLab**  
Solar Façades



Im TestLab Solar Façades charakterisieren wir transparente, transluzente und opake Materialien, prüfen Fassadenbauteile und bewerten die energetischen, thermischen und optischen Eigenschaften von kompletten Fassaden. Dabei geht es sowohl um »passive« Fassadenbauteile wie Verglasungen und Sonnenschutzvorrichtungen, die klassische Funktionen wie Wärmeschutz, Sonnenschutz und Tageslichtbeleuchtung bieten, als auch um »aktive« Fassadenkomponenten, die Sonnenenergie in Strom oder Wärme umwandeln.

Das TestLab Solar Façades ist für die messtechnische und rechnerische Prüfung von Transmission, Reflexion, g-Wert und U-Wert akkreditiert. Unsere Spezialität liegt in der Prüfung von Objekten, die mit herkömmlichen Prüfmethoden oftmals nur unzureichend charakterisiert werden können, wie Bauteilen mit winkelabhängigem Verhalten, lichtstreuenden Materialien oder strukturierten und lichtlenkenden Elementen. Die Dienstleistungen des TestLab Solar Façades werden auch für Bereiche genutzt, die keinen Bezug zu Fassaden haben (z. B. Bestimmung des »Solar Reflectance Index-SRI« für Dach- und Bodenbeläge).

Wir verfügen über umfangreiche Forschungserfahrung im Bereich der Sonnenschutzsysteme, der bauwerkintegrierten Photovoltaik (BIPV) und der bauwerkintegrierten Solarthermie (BIST). Wir sind spezialisiert auf die mathematische und physikalische Modellierung optischer, thermischer und PV-elektrischer Prozesse in sonnenbestrahlten Fassaden sowie auf die Analyse ihrer Effekte auf die energetischen Eigenschaften des Gebäudes.

Goniometrisch ermittelte BSDF-Datensets (Bi-Directional Scattering Distribution Function) werden in Simulationsprogrammen zur Bewertung von Tageslichtnutzung und Blendung, z. B. für Büroräume mit komplexen Fenster- und Sonnenschutzsystemen, genutzt. Studien zu Nutzerpräferenzen und visuellem Komfort werden in drehbaren Tageslicht-Testeinrichtungen durchgeführt.

<sup>1</sup> *Transmissionsprüfung an strukturierten Bauteilen und Elementen (hier: teiltransparenter Fassadenkollektor).*

### *g-Wert Prüfung, U-Wert Prüfung*

Dipl.-Ing. (FH) Ulrich Amann  
Telefon +49 761 4588-5142

### *BIPV, Sonnenschutz*

Dr. Tilmann Kuhn  
Telefon +49 761 4588-5297

### *Solarthermische Fassaden*

Dr. Christoph Maurer  
Telefon +49 761 4588-5667

### *Spektrometrie, Goniometrie, SRI und Farbmessung*

Dr. Helen Rose Wilson  
Telefon +49 761 4588-5149

### *Tageslichtmessräume*

Dr. Bruno Bueno  
Telefon +49 761 4588-5377

---

## Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » Transmission, Reflexion und g-Wert nach DIN EN 410, ISO 9050, DIN EN 13363, DIN EN 14500, DIN EN 14501
- » Wärmeleitfähigkeit und U-Wert nach ISO 8302, DIN EN 673, DIN EN 674
- » Solar Reflectance Index (SRI) nach ASTM E1980



## Prüfung von Kollektoren, Speichern und Systemen

testlab-sts@ise.fraunhofer.de | www.kollektortest.de

**TestLab**  
Solar Thermal  
Systems



Auch 2017 wurde die hohe Qualität und Befähigung des TestLab Solar Thermal Systems durch die Fortschreibung der Akkreditierung durch die Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS bestätigt. Wir bieten unseren Kunden damit auch international einen erleichterten Marktzugang. Das Portfolio deckt sämtliche Bauarten von Sonnenkollektoren und Wärmespeichern sowie Komplettsysteme ab. Auch bei innovativen Ansätzen unterstützen wir mit unseren Prüfmöglichkeiten Kunden bei der Entwicklung von solarthermischen Heizungssystemen.

Seit 2012 prüfen wir intensiv unterschiedlichste Fragestellungen bezüglich der mechanischen Widerstandsfähigkeit (bei  $-40\text{ °C}$  bis  $90\text{ °C}$ ) von Montagesystemen, PV-Modulen und Solarthermiekollektoren, auch deutlich über Beschränkungen der normativen Methoden hinaus. Für PVT-Kollektoren bieten wir mit dem ebenfalls akkreditierten TestLab PV Modules des Fraunhofer ISE eine komplette Zertifizierungsmessung (IEC und ISO) an. Wir verfügen zudem über einen akkreditierten Teststand für Solarluftkollektoren.

Weitere Produkttypen können in unserem System- und Speicherlabor vermessen werden. Hier werden auch die notwendigen Kennzahlen zur Bewertung von Speichern nach dem Energy Label (ErP) der EU ermittelt. Auch Mehr-Quellen-Systeme wie die Kombination von PVT-Kollektoren mit einer Wärmepumpe können hier als Gesamtaufbau geprüft werden. Unser Indoor-Teststand mit Solarsimulator liefert eine hohe Wiederholgenauigkeit, was besonders auch im Entwicklungskontext von hoher Bedeutung ist. Mit der Weiterentwicklung von in situ Charakterisierung ergeben sich im TestLab Solar Thermal Systems bei der verbreiteten Kollektorzertifizierung auch neue Anwendungsmöglichkeiten. Wir prüfen grundsätzlich nach der aktualisierten EN ISO 9806:2017. Diese kann direkt für alle in den Anwendungsbereich aufgenommenen Technologien sowie die Änderungen in den Testmethoden innerhalb unseres Akkreditierungsumfangs angeboten werden.

### *in situ Vermessung*

Dr. Korbinian S. Kramer  
Telefon +49 761 4588-5139

### *Kollektoren*

Dipl.-Ing. (FH) Stefan Mehnert  
Telefon +49 761 4588-5741

### *Speicher, Systeme*

Dipl.-Ing. (FH) Konstantin Geimer  
Telefon +49 761 4588-5406

---

### Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach  
DIN EN ISO / IEC 17025
- » EN ISO 9806
- » EN 12975
- » EN 12976-1,2
- » EN 12977-1,2,3,4,5
- » Solar Keymark
- » CE
- » SRCC

1 Kollektor im Hagelteststand.



## Charakterisierung leistungselektronischer Geräte

testlab-pe@ise.fraunhofer.de

**TestLab**  
Power Electronics



Im akkreditierten TestLab Power Electronics charakterisieren wir leistungselektronische Geräte bis in den Megawatt-Bereich. Hierfür stehen parametrierbare DC-Quellen mit einer Gesamtleistung von 1,4 MW zur Verfügung, die unter anderem das Verhalten von PV-Generatoren nachbilden können. Hochgenaue und hochdynamische Leistungsmessgeräte dienen zur Charakterisierung von Prüflingen. Für den Betrieb netzgekoppelter Umrichter bis zu 1,25 MVA Leistung können wir im Labor flexibel AC-Spannungen von 255 bis 790 V bereitstellen. Wir können Netzfehler im Mittelspannungsnetz simulieren, um die dynamische Netzstützung von Erzeugungseinheiten zu untersuchen (Low Voltage Ride Through (LVRT) und High Voltage Ride Through (HVRT)). Weitere Analysen führen wir mit einem 600-kW-Netzsimulator durch.

Außerhalb unserer Laborräume bieten wir unseren Kunden Vermessungen im Feld an, etwa in großen PV-Kraftwerken. Hierfür können sechs Messsysteme mit je 16 Messkanälen frei verteilt eingesetzt werden. In unserem Outdoor-Testfeld steht ein variabel konfigurierbarer PV-Generator mit einer Leistung von 1 MWp zur Verfügung, der für Tests an Wechselrichtern unter realen Bedingungen verwendet werden kann. Ein Netzanschluss ist sowohl nieder- als auch mittelspannungsseitig möglich. Mit einem 4,5-MVA-LVRT-Testcontainer können auch größere Erzeugungseinheiten (z. B. Blockheizkraftwerk) geprüft werden.

Wir vermessen Erzeugungseinheiten nach internationalen Einspeiserichtlinien (z. B. Deutschland, China, Großbritannien), charakterisieren Batterieumrichter mittels eigens entwickelter Prüfverfahren und bestimmen hochgenau den Wirkungsgrad leistungselektronischer Geräte. Wir unterstützen unsere Kunden bei der Modellierung von Erzeugungseinheiten, PV-Kraftwerken oder Netzabschnitten. Bei der Planung und Durchführung von Messkampagnen reagieren wir jederzeit flexibel auf die Bedürfnisse unserer Kunden und bieten auch im Vorfeld ausführliche Beratung und Unterstützung.

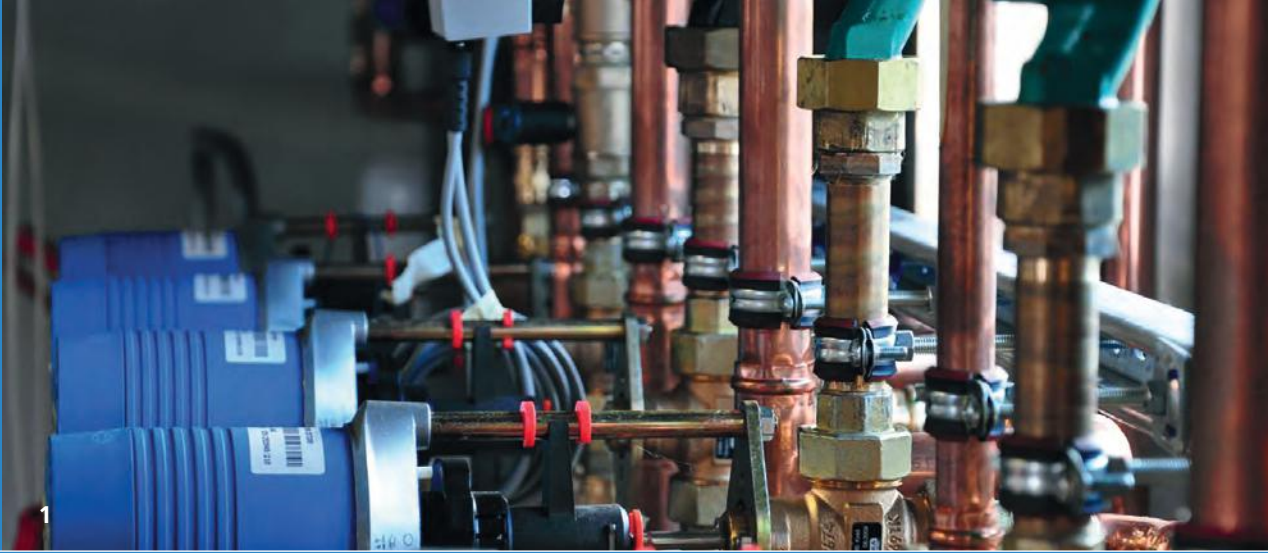
Roland Singer M. Eng.  
Telefon +49 761 4588-5948

### Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » FGW TR3 Revision 23 / 24: Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz
- » FGW TR4 Revision 7 / 8: Anforderungen an Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten und -anlagen.
- » DIN EN 61400-21: Messung und Bewertung der Netzverträglichkeit von netzgekoppelten Windenergieanlagen
- » DIN EN 61683: Photovoltaische Systeme – Stromrichter – Verfahren zur Messung des Wirkungsgrads
- » DIN EN 50530: Gesamtwirkungsgrad von Photovoltaik-Wechselrichtern
- » TLPE-HV-001: Bestimmung der Umwandlungseffizienz von bidirektionalen Umrichtern basierend auf der DIN EN 50530
- » LPE-HV-002: Bestimmung des Wirk- und Blindleistungs-Verhaltens bidirektionaler Umrichter basierend auf der TR3
- » TLPE-HV-003: Bestimmung des Frequenz-Wirkleistungs-Verhaltens (P(f)) von bi-direktionalen Umrichtern basierend auf der TR3

<sup>1</sup> Laborräume des TestLab Power Electronics.





## Vermessung und Prüfung von Wärmepumpen

testlab\_heatpumps@ise.fraunhofer.de

**TestLab**  
Heat Pumps  
and Chillers



Das TestLab Heat Pumps and Chillers bietet neueste Technik zur Entwicklung, Vermessung und Charakterisierung von Wärmepumpen und Kältemaschinen sowie deren Komponenten. Das modulare Prüfstandkonzept ermöglicht Tests verschiedener Technologien und Systemkonfigurationen in einem breiten Spektrum von Betriebsbedingungen mit verschiedenen Wärmeträgermedien (Luft, Wasser, Sole). Neben Anlagen mit einem elektrischen Antrieb von bis zu 30 kW Anschlussleistung können auch thermisch mit Wärme, Erd- oder Prüfgas angetriebene Geräte vermessen werden. Das Labor verfügt über ein integrales Sicherheitskonzept, das den Aufbau und die Vermessung von Komponenten und Systemen mit brennbaren Kältemitteln oder Ammoniak erlaubt.

In einer kalorimetrischen Doppelklimakammer können Prüflinge bis zu 100 kW Wärme- oder Kälteleistung (50 kW im kalorimetrischen Betrieb) bei Temperaturen von -25 °C bis 50 °C und relativen Luftfeuchten von 25 % bis 95 % vermessen werden. Für die Konditionierung von Wasser oder Sole stehen mehrere Anlagen zu Verfügung, die das entsprechende Medium auf Temperaturen von -25 °C bis 95 °C im Leistungsbereich bis 75 kW bereitstellen können. In den drei Luftstrecken kann der Luftstrom (80 m<sup>3</sup>/h bis 5000 m<sup>3</sup>/h) im Temperaturbereich von -15 °C bis 50 °C bei relativer Luftfeuchtigkeit von 15 % bis 95 % konditioniert werden.

In unserem Labor können Anlagen nach allen gängigen Normen und Regelwerken vermessen werden. Im Februar 2018 wurde es nach ISO/IEC 17025 zum TestLab Heat Pumps and Chillers akkreditiert. Über die standardisierten Methoden hinaus entwickeln wir zusammen mit unseren Kunden individuelle Messverfahren, die den Entwicklungs- und Optimierungsprozess von Geräten und komplexeren Systemen durch realitätsnahe, dynamische Prüfabläufe, inkl. »Hardware-in-the-Loop«, zeit- und kosteneffizient gestalten lassen. Wir konzipieren und betreiben auch komponentenspezifische Teststände (z. B. Verdichterteststand, diverse Wärmeübertrager-Teststände), bei denen modernste Mess- und Analysetechnik für spezifische Fragestellungen aus den Bereichen Strömungsmechanik, Akustik, Vibrationen und Gasanalyse zum Einsatz kommen (z. B. Particle Image Velocimetry, Laser Doppler Anemometry, Shadowgraphie, Gaschromatographie, Scanning Vibrometrie).

DI Ivan Malenković  
Telefon +49 761 4588-5533  
Mobil +49 162 205 3924

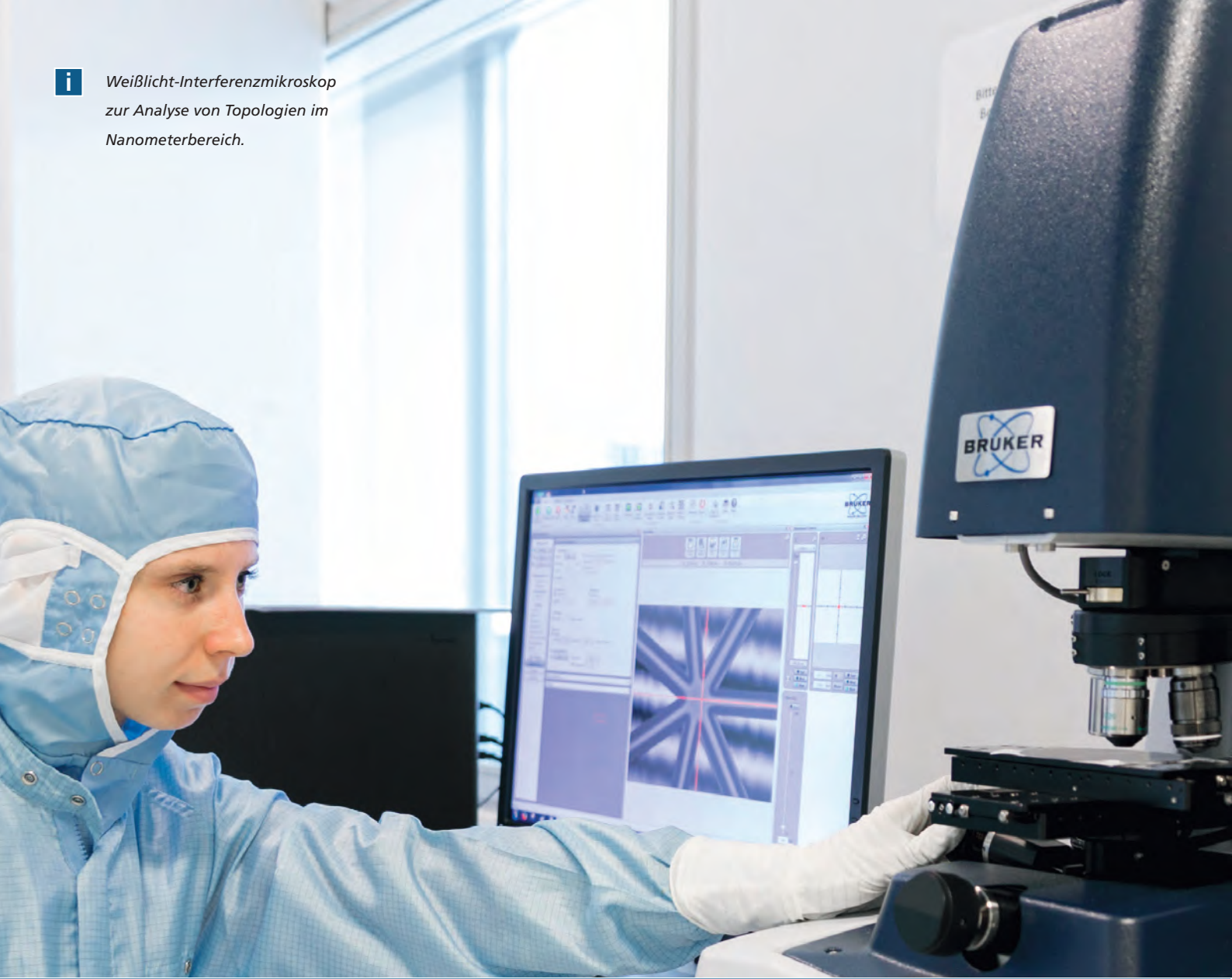
### Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach DIN EN ISO / IEC 17025
- » Prüfnormen EN 14511, EN 14825, EN 16147, EN 12309
- » Alle Prüfungen für Energy Labelling der Wärmepumpen und Kältemaschinen im Rahmen der Ecodesign-Richtlinie
- » Heat Pump Keymark
- » EHPA-Gütesiegel
- » Nach der F-Gase-Verordnung, Klasse I, zertifizierte Mitarbeitende

1 *Wärmepumpenteststand im TestLab Heat Pumps and Chillers am Fraunhofer ISE.*



Weißlicht-Interferenzmikroskop  
zur Analyse von Topologien im  
Nanometerbereich.



# FuE-INFRASTRUKTUR

Eine Besonderheit des Fraunhofer ISE ist seine hervorragende technische Infrastruktur. 15 000 m<sup>2</sup> Laborfläche und hochmoderne Geräte und Anlagen sind Grundlage unserer Forschungs- und Entwicklungskompetenzen. Darunter sind derzeit 500 m<sup>2</sup> Reinraumfläche. Die FuE-Infrastruktur des Fraunhofer ISE gliedert sich in acht Laborzentren sowie vier produktionsnahe Technologie-Evaluationszentren:

- » Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen
- » Zentrum für neuartige PV-Technologien
- » Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien
- » Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme
- » Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse
- » Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze
- » Zentrum für Optik und Oberflächenforschung
- » Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe
- » SiM-TEC – Silicon Materials Technology Evaluation Center
- » PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center
- » Module-TEC – Module Technology Evaluation Center
- » Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center

Die technische Infrastruktur wird kontinuierlich weiter entwickelt, so dass das Institut für seine Kunden stets Forschungs- und Entwicklungsprojekte auf dem neuesten Stand der Technik durchführen kann. So wurde 2017 der Grundstein für ein neues Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen gelegt, in dem ab 2020 weitere Innovationen für die Solarzellentechnologie entwickelt werden sollen. Auf den folgenden Seiten werden acht der entwicklungs- bzw. produktionsnahen Technologiezentren näher vorgestellt.



## Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen

Dr. Martin Hermle | Telefon +49 761 4588-5265 | Dr. Frank Dimroth | Telefon +49 761 4588-5285

Im »Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen« evaluieren wir Technologien, mit denen höchste PV-Wirkungsgrade erreicht werden können und setzen sie auf internationalem Spitzenniveau um. Zu den Anwendungsmöglichkeiten von Höchsteffizienz solarzellen gehören neben herkömmlichen Solarmodulen auch die Stromversorgung von Satelliten, Elektroautos, autarken Sensoren sowie elektronischen Geräten. Das Fraunhofer ISE hält im Bereich der höchsteffizienten Solarzellen mehrere Weltrekorde, wie den Wirkungsgradrekord für multikristallines Silicium (22,3%), aber auch den absoluten Wirkungsgradrekord von 46,1%, basierend auf einer III-V-Mehrfachzellarchitektur.

Um diese Spitzenstellung weiter ausbauen zu können, haben wir 2017 den Grundstein für ein neues Laborgebäude gelegt, das über eine an die künftigen technologischen Herausforderungen angepasste Reinraumausstattung verfügen wird. Im neuen »Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen« können auf mehr als 1000 m<sup>2</sup> modernster Laborfläche fortschrittliche

PV-Technologien getestet und optimiert werden. Dort sollen innovative Prozesse und Technologien für den künftigen Einsatz in der Industrie erforscht werden. Neben der Weiterentwicklung der Silicium- und III-V-Technologie, liegt ein Fokus des neuen Zentrums in der Kombination dieser beiden Materialien: Höchsteffiziente siliciumbasierte Tandemzellen sind eine der vielversprechendsten Zukunftstechnologien der Photovoltaik. Mit dem neuen Laborgebäude will das Fraunhofer ISE auch in Zukunft wegweisende neue Solarzellentypen und -Technologien entwickeln und zur Wettbewerbsfähigkeit der deutschen PV-Industrie beitragen.

1 *Visualisierung des »Zentrums für höchsteffiziente Solarzellen« auf dem Campus des Fraunhofer ISE in Freiburg. Für den Neubau wurde im Oktober 2017 der Grundstein gelegt. © BW+P Architekten*

### Technische Ausstattung

- » Flexibel nutzbarer Reinraum mit künftig 740 m<sup>2</sup>
- » Zusätzliche weitere Laborflächen von 340 m<sup>2</sup>
- » Hochtemperaturdiffusion (BBr<sub>3</sub>, POCl<sub>3</sub>)
- » Hochtemperaturoxidation (trocken und feucht)
- » Ionenimplantation (P, B, H, Ga, Si)
- » Nasschemische Prozesse zur Reinigung und Strukturierung
- » Gelblichtbereich für Photo- und Laserlithographie zur Erzeugung von Mikrostrukturen mit beidseitiger Alignierung
- » Waferbonding-Technologie
- » Plasmatechnologie (PECVD und Ätzen)
- » Atomlagenabscheidung (ALD)
- » Bearbeitung von flexiblen Wafergrößen bis zu 157 x 157 mm<sup>2</sup>
- » Thermisches- und Elektronenstrahlverdampfen von Metallen und dielektrischen Schichten
- » Galvanische Metallverdickung
- » Umfangreiche Ausrüstung zur Material- und Bauelementcharakterisierung



1



2

## Zentrum für Optik und Oberflächenforschung

Dr. Thomas Kroyer | Telefon +49 761 4588-5968 | Dr. Benedikt Bläsi | Telefon +49 761 4588-5995

Im »Zentrum für Optik und Oberflächenforschung« entwickeln wir optisch-funktionale Oberflächen für eine Vielzahl von Anwendungen. Dazu setzen wir großflächige Beschichtungs- und Strukturierungsprozesse ein.

In der Beschichtungstechnologie erarbeiten wir Lösungen basierend auf dem Sputterverfahren für die Bereiche Solarthermie, Photovoltaik, Energieeffizienz, Dünnschichtbatterien und Wasserstofftechnologie. Die Anwendungen umfassen z. B. Spiegel und Absorber für solarthermische Kraftwerke, transparente Elektroden und farbige Abdeckscheiben für Photovoltaik, Low-Emissivity und Solar Control-Coatings sowie optisch schaltbare Systeme für energieeffiziente Gebäude. Zusätzlich zur Optimierung der optischen Eigenschaften maßschneidern wir Schichtsysteme für die jeweiligen Anforderungen des Endprodukts, z. B. Langzeitstabilität im Außeneinsatz oder industrielle Skalierbarkeit. Weiterhin bieten wir Unterstützung bei der Systemintegration der funktionellen Schichtsysteme, z. B. im Modul oder in der Fassade. Unser Leistungsspektrum umfasst Machbarkeitsstudien, Kleinserienfertigungen sowie Produktentwicklungen bis hin zum fertigen industriellen Prototypen.

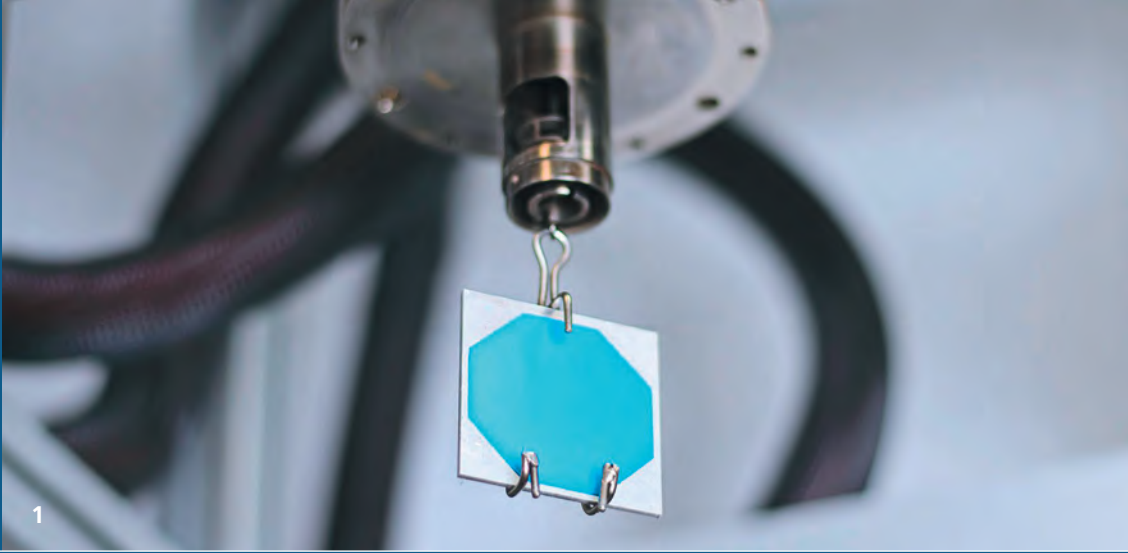
Die Strukturierung der Oberflächen im Bereich von Mikro- und Nanometern ermöglicht verschiedenste optische wie auch nicht-optische Funktionalitäten. Die großflächige Herstellung solcher Oberflächenstrukturen in maßgeschneiderten Formen und Dimensionen ist die Grundlage für eine industrielle Umsetzbarkeit. In Solarzellen führen photonische Strukturen zu effizientem Lichteinfang und verbesserter Ausnutzung der solaren Einstrahlung. In Beleuchtungsanwendungen werden Mikro- und Nanostrukturen genutzt, um Licht aus LEDs auszukoppeln oder in gewünschte Richtungen zu lenken. In Displays werden funktionale Strukturen für Entspiegelung, polarisationsoptische Anwendungen oder Lichtlenkung eingesetzt. Auch bei der Modifikation nichtoptischer Eigenschaften spielen Mikro- und Nanostrukturen eine Rolle, z. B. bei der Beeinflussung der Benetzbarkeit, Haftung oder Reibung von Oberflächen.

**1** Horizontale Sputteranlage, Beschichtungsfläche 1,5 x 4 m<sup>2</sup>, bestückt mit bis zu 10 Planar- und Doppelrohrkathoden sowie einer Plasmaätzstation.

**2** Interferenzlithographie-Aufbau für die Erzeugung nahtloser Mikro- und Nanostrukturen auf Flächen bis 1,2 x 1,2 m<sup>2</sup>.

### Technische Ausstattung

- » Moderne Sputteranlagen mit einer Beschichtungsfläche bis zu 1,5 x 4 m<sup>2</sup> bei maximal 16 cm Stichhöhe
- » Substrate: ebene und gebogene Glasscheiben, Polymerfolien sowie Metallbleche und -rohre
- » Interferenzlithographie-Aufbauten zur Erzeugung von Masterstrukturen mit Strukturdetails zwischen 100 nm und 100 µm homogen auf Flächen bis 1,2 x 1,2 m<sup>2</sup>
- » Nanoimprint- und Heißpräge-Anlagen um Mikro- und Nanostrukturen auf Prototypen zu übertragen
- » Rollen-Nanoimprint-Aufbau für produktionsnahe Prozesse
- » Plasmaätzen zur Übertragung geimprinteter Strukturen in nicht polymere Materialien
- » Charakterisierung der elektrischen, optischen, mikrostrukturellen und chemischen Schicht- und Struktureigenschaften: Fourierspektrometer, Schichtspannungsmessung, Rasterelektronenmikroskopie (REM), Rasterkraftmikroskopie (AFM), Augerspektrometer, mechanische Abriebtests, elektrochemische Methoden



## Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse

Dr. Karl-Anders Weiß | Telefon +49 761 4588-5474 | PV-Module: Daniel Philipp | Telefon +49 761 4588-5414  
 PV-Zellen: Dr. Martin Schubert | Telefon: +49 761 4588-5660

Im »Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse« bündelt das Fraunhofer ISE seine technischen Kompetenzen zur Prüfung und Vermessung einer Vielzahl unterschiedlicher Materialien, die für die aktive und passive Nutzung der Solarenergie, Energiespeicherung und in der Gebäudetechnik eingesetzt werden.

Ein Schwerpunkt ist die umfassende Ermittlung der Materialeigenschaften. Wir verfügen über besondere Expertise für die Untersuchung von Halbleitermaterialien, Solarzellen, Photovoltaikmodulen, thermochemischen und porösen Materialien (z. B. Zeolithe), Phasenwechselmaterialien (PCM), Phasenwechselfluide (PCS), Polymeren sowie Beschichtungen auf Glas und Metallen. Wir entwickeln zudem geeignete, neue

Methoden zur Materialcharakterisierung, insbesondere zerstörungsfreie Analyseverfahren. Für die Untersuchung von Materialien unter Anwendungsbedingungen und verschiedenen Belastungsfällen, z. B. in unterschiedlichen Klimazonen, haben wir besondere Kompetenzen. Um die Leistungsfähigkeit und Gebrauchsdauer von Materialien in diesen verschiedenen Anwendungen abzuschätzen, nutzen wir Daten aus analytischen Messungen, dem Realbetrieb und aus beschleunigten Altersprüfungen. Wir erarbeiten zudem Modelle zur Berechnung des Materialverhaltens und der Degradation.

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

### Technische Ausstattung

#### Materialcharakterisierung

- » Dilatometer
- » Differenzkalorimeter (10 µl bis 10 ml, -90 bis 700 °C)
- » Temperatur-Stufen-Kalorimeter (bis 100ml, -10 bis 180 °C)
- » Plattenapparatur (bis zu 50 cm x 50 cm) zur Bestimmung der temperaturabhängigen Wärmekapazität
- » Laser-Flash- und Hitzdraht-Apparaturen zur Bestimmung der Wärme- und Temperaturleitfähigkeit (-90 °C bis 500 °C)
- » Lock-in-Thermographie und Elektrolumineszenz
- » BET-Porosimetrie zur Ermittlung von Porenstruktur und Oberfläche hochporöser Materialien
- » Röntgendiffraktometer (XRD) zur Kristallstrukturbestimmung
- » Konfokales Raman-Mikroskop mit AFM
- » Rotationsrheometer zur Bestimmung des Fließverhaltens von Materialien im Temperaturbereich -20 °C bis 600 °C

- » Massenspektrometer für die temperaturabhängige Ermittlung der Permeationseigenschaften von Barrierematerialien
- » FT-IR-Spektrometer mit integrierenden Kugeln (UV/Vis, IR)
- » Photolumineszenz-, Thermographie- und elektrische Verfahren für die orts aufgelöste und quantitative Analyse von Siliciummaterialqualität und Solarzellen

#### Gebrauchsdaueranalyse

- » Freibewitterungsanlagen mit umfassendem Monitoring in verschiedenen Klimazonen
- » Temperaturwechselprüfungen von PCM und hydrothermales Zyklieren von Adsorbens-Verbundproben
- » Prüfaufbauten zur Degradationsuntersuchung von Materialien und Komponenten für HL-Materialien, Solarzellen und Module



## Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme

Dr. Matthias Vetter | Telefon +49 761 4588-5600 | Dr. Daniel Biro | Telefon +49 761 4588-5246

Das Fraunhofer ISE setzt im »Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme« einen besonderen Schwerpunkt auf die Batterietechnologie. So arbeiten wir mit neuartigen Materialien und an innovativen Produktionsverfahren für Batteriezellen und beschäftigen uns mit neuen Ansätzen für die Batteriesystemtechnik – von der Zelle über das Modul bis zum Batteriespeicher inklusive Batteriemangement und thermischem Management. Wir optimieren Verfahren zur Ladezustands- und Alterungsbestimmung sowie zur Lebensdauervorhersage. Zudem beschäftigen wir uns mit optimierten Lade- und Betriebsführungsstrategien sowie Batteriesystemprototypen für verschiedenste Anwendungsgebiete.

Zu unseren Tätigkeiten gehören auch die Modellierung und Simulation von Batterien. Dabei arbeiten wir mit elektrischen, elektrochemischen und thermischen Modellen auf Material-, Zell- und Systemebene. Wir führen umfassende Tests und Prüfungen von Batterien durch, darunter Performance- und

Alterungsuntersuchungen (kalendarisch, zyklisch), thermische Untersuchungen, Abuse-Tests sowie Post-Mortem-Analysen. Wir verfügen darüber hinaus über die Kompetenzen, um verschiedene PV-Speichersysteme, wie Pico-PV-Systeme, Solar Home Systeme, PV-Hybridssysteme, netzgekoppelte PV-Batteriespeicher und Speichersystemkomponenten (Laderegler, Energiemanagementsysteme, etc.) zu testen und zu prüfen.

Wir beschäftigen uns mit der umfassenden Qualitätssicherung elektrischer und thermischer Speichersysteme. Die hierfür eingesetzten Methoden reichen von der simulationsbasierten Systemauslegung und -optimierung über Systemtests im Labor und Feld bis hin zum Anlagenmonitoring. Im Bereich der thermischen Speicher umfasst dies sowohl Wärme- als auch Kältespeicher.

1 *Entwicklungs- und Prüfzentrum für Batterietechnik.*

### Technische Ausstattung

- » Basisprozesskette zur Herstellung und Verarbeitung von Materialien für Batteriezellen
- » Testkreise für die Zyklisierung von kleinen Batteriezellen und Messsysteme für die elektrochemische Charakterisierung von neuen Batteriechemien
- » Batterietestkreise bis zum System mit 250 kW (1000 V, 600 A)
- » Klimakammern mit Schutzeinrichtungen
- » Isothermes Batterie-Kalorimeter
- » Hochgenauer Coulombmetrie-Teststand
- » Teststände für komplette PV-Heimspeichersysteme bis 15 kW (Hardware-in-the-loop)
- » Testeinrichtungen für DC-Anwendungen, z. B. für Leuchtmittel
- » Elektroniklabor für die Entwicklung von Batteriemangementsystemen und Elektronik für PV-Kleinsysteme
- » Off-Grid-Labor: Test- und Prüfeinrichtungen für die Charakterisierung und Zertifizierung von PV-Batterie Kleinsystemen (Pico-PV-Systeme und Solar Home System Kits), Komponenten (z. B. Laderegler) und DC-versorgten Produkten
- » PV- Batterie-Dieselsysteme Teststand
- » Teststände zur Charakterisierung von thermischen Speichern im Temperaturbereich von -30 bis 550 °C
- » Monitoringsysteme zur energetischen Analyse von thermischen Speichern in der Anwendung
- » Testeinrichtung zur Vermessung von Speichern nach EN 12977-3



## Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe

Dr. Christopher Hebling | Telefon +49 761 4588-5195

Im »Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe« werden Komponenten und Subsysteme der Wasserstofftechnologie in den Bereichen PEM-Elektrolyse, PEM-Brennstoffzellen (besonders für die automobiler Anwendung), Power-to-Gas (PtG) und Power-to-Liquid bzw. auch Power-to-Chemicals getestet und mit wissenschaftlich fundierten Methoden charakterisiert.

1 *Klimakammer zur Charakterisierung von Brennstoffzellenstapeln und -systemen mit Leistungen bis 5 kW<sub>el</sub>.*

### Technische Ausstattung

#### PEM-Elektrolyse

- » Zwei Teststände zur Charakterisierung von Elektrolysestacks (200 kW und 1 MW)
- » Einspeiseanlage von Wasserstoff in eine Erdgaspipeline zur Untersuchung der PtG-Technologie
- » Mehrere Einzelzellmessstände und Teststände für Shortstacks zur vollautomatischen Charakterisierung von PEM-Elektrolysezellen in einem weiten Betriebsfenster
- » Wasserstofftankstelle als Forschungsplattform zur Betestung neuer Sensorik und Verfahren

#### PEM-Brennstoffzellensysteme

- » Anlage zur Mehrkanal-Impedanzspektroskopie für die orts aufgelöste Charakterisierung (automobiler) Einzelzellen
- » Mehrkanal-Impedanzspektroskopie zum simultanen Einzelzellmonitoring für (automobile) Kurzstapel

- » Vollautomatisierter Teststand zur Charakterisierung von (automobilen) Kurzstapeln bis 20 kW/1000 A mit der Möglichkeit zur Einbindung von Peripheriekomponenten für systemnahe Tests
- » Mehrere hochwertige, vollautomatisierte Einzelzellteststände zur in situ Charakterisierung von Brennstoffzellen-Komponenten und Einzelzellen
- » Begehbare Klimakammer mit einem Temperaturbereich von -40 °C bis +80 °C und einem Feuchtebereich von 5 bis 95 % relativer Feuchte

#### Synthetische Kraftstoffe

- » Bestimmung von Zündverzugszeiten flüssiger und/oder gasförmiger Kraftstoffe
- » Vollautomatisierte Miniplant-Anlage inkl. Rezyklierung nicht umgesetzter Edukte zur Synthese flüssiger Kraftstoffe wie Methanol aus CO<sub>2</sub>-reichen Feedgasen und Wasserstoff



## PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center

Dr. Ralf Preu | Telefon +49 761 4588-5260

Das PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center am Fraunhofer ISE wurde im Jahr 2005 aufgebaut, um die Lücke zwischen Laborforschung und industrieller Anwendung zu schließen. In diesem Großlabor stehen modernste Prozess- und Charakterisierungsgeräte für die Entwicklung von Siliciumsolarzellen zur Verfügung.

Das PV-TEC fokussiert sich auf folgende Kernthemen im Bereich der Produktionstechnologie und Messtechnik für kristalline Siliciumsolarzellen:

- » Evaluation und Entwicklung von Herstellungsprozessen und Prozesstechnologiekomponenten
- » Entwicklung und Fertigung von fortgeschrittenen industriellen Solarzellenstrukturen
- » Charakterisierung und Entwicklung von Materialien und Solarzellen
- » Schulung und Training für PV-Technologie
- » Prozesstransfer mit Vor-Ort-Unterstützung
- » Ökonomische Kostenstudien

Das PV-TEC bedient Unternehmen aus allen Bereichen der PV-Wertschöpfungskette, wie Solarzellen- und Modulhersteller, Anlagen- und Materialhersteller (Silicium und Prozessmaterialien).

### PERC-Solarzellen

Im PV-TEC des Fraunhofer ISE arbeiten wir an der kontinuierlichen Weiterentwicklung und Optimierung des Standardprozesses zur Herstellung von Siliciumsolarzellen und erweitern diesen um innovative Prozesse, wie Diffusions- und Laserprozesse zur Erzeugung selektive Emitter oder Druckprozesse für Feinlinienkontakte mit Kontaktbreiten unter 30 µm. Hierdurch ist sichergestellt, dass im PV-TEC ein hochwertiger kontinuierlich optimierter Baseline-Prozess zur Verfügung steht, der die Referenz für die Prozessentwicklungen darstellt. Das PV-TEC ist in der Lage, auch teilprozessierte Solarzellen für alle industriellen Formate zu verwenden sowie ausgewählte Prozesse und Prozesssequenzen zu evaluieren.

Der Fokus der Arbeiten liegt dabei derzeit auf der PERC-Solarzelle (PERC: passivated emitter and rear cell), die eine signifikante Wirkungsgradsteigerung ermöglicht und aktuell von zahlreichen Firmen in den Markt eingeführt wird. Ein weiterer Schwerpunkt sind Solarzellen mit passivierten Kontakten, die mit einem Wirkungsgradpotenzial von über 25 % den nächsten Schritt der Entwicklung darstellen.

1 *Eingabebereich einer großflächigen Mehrkammer-PECVD-Beschichtungsanlage.*

### Technische Ausstattung

#### *PV-TEC Front-End*

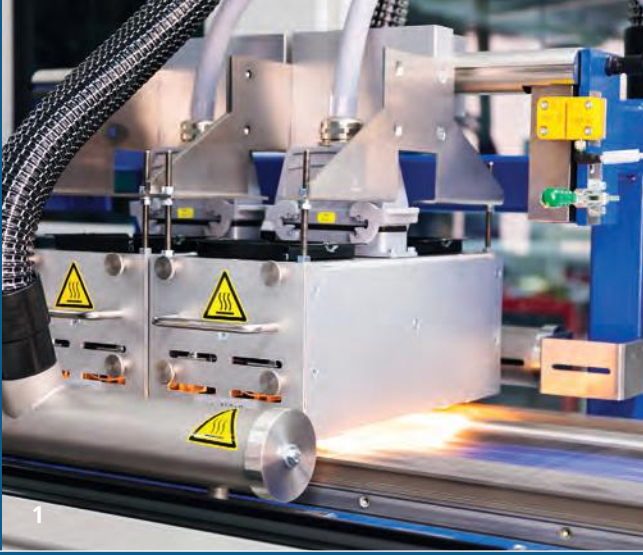
- » Nasschemische Batch- und Inline-Anlagen zur Texturierung, Reinigung und einseitigen Oberflächenbearbeitung
- » Vollautomatisierte Rohrofenanlagen zur Diffusion, Oxidation und Abscheidung polykristalliner Si-schichten
- » Voll- und teilautomatisierte PECVD- Anlagen zur Abscheidung dielektrischer sowie intrinsischer und dotierter amorpher Si-Schichten

- » PVD-Anlagen zur Abscheidung metallischer und transparenter leitfähiger Schichten (TCO)

#### *PV-TEC Back-End*

- » Druck- und Lasertechnologische Prozessanlagen
- » Durchlauföfen - hochflexibler Zelltester
- » Vollautomatisierte Siebdrucklinie inkl. einer Dispenseinheit für die Feinlinienvorderseitenmetallisierung
- » Zahlreiche teilautomatisierte Druckprozessanlagen: Siebdruck, Dispensen, Inkjet und Rotationsdruck





## Module-TEC – Module Technology Evaluation Center

Dipl.-Ing. (FH) Martin Wiese | Telefon +49 761 4588-5043

Das Module-TEC bietet umfassende Möglichkeiten zur Entwicklung von Modultechnologien. Es schließt die Lücke zwischen Laborentwicklung und industrieller Produktionstechnologie, indem es die Verarbeitung von aussagekräftigen Stückzahlen und Formaten erlaubt. Neben der Produktions- und Prozesstechnologie stehen umfangreiche Analysemöglichkeiten für die Qualitätskontrolle zur Verfügung. Unsere Forschungsschwerpunkte sind die Verschaltungstechnik von kristallinen Solarzellen, die Modulintegration von Hocheffizienzzellen sowie die Analyse und Optimierung der Moduleffizienz. Daneben entwickeln wir anwendungsspezifische Sondermodule für die Gebäude- (BiPV) und die Fahrzeugintegration.

**1** *Infrarot-Verbindungstechnik zur vollautomatisierten Serienschaltung von hocheffizienten kristallinen Solarzellen.*

**2** *Halb- und vollautomatisierte Teststände zur elektrischen Kontaktierung von Solarzellen.*

### Innovative Klebeverbindungen

Für die Serienschaltung von kristallinen Solarzellen steht ein hochmoderner industrieller Stringer mit Infrarot-Löttechnik zur Verfügung. Die Anlage erlaubt die elektrische Kontaktierung von Solarzellen in den derzeit gängigen 6-Zoll-Formaten mit 3, 4 oder 5 Busbars. Zusätzlich können Halbzellen vollautomatisiert mit einem hohen Durchsatz verschaltet werden.

Die Besonderheit der Anlage besteht darin, dass neben dem marktüblichen Verfahren der Lötverbindung auch eine schonende Kontaktierung der Solarzellen mit elektrisch leitfähigen Klebstoffen (ECA) vollautomatisiert durchgeführt werden kann. Dieses innovative Konzept der Klebeverbindung eignet sich besonders für temperatursensitive Hocheffizienzzellen wie Heterojunction-Solarzellen. Ein technisch ausgefeiltes Niederhalterkonzept in Verbindung mit IR-Strahlung ermöglicht eine kontaktlose und mechanisch besonders schonende Verarbeitung der Zellen bei industriellen Taktraten.

### Technische Ausstattung

- » Voll- und halbautomatisierte Anlagen zur elektrischen Zellverschaltung (IR, Kontakt, Induktion)
- » Rückkontaktstringer zur vollautomatisierten Verschaltung von Zellen verschiedener Formate mit beiden Kontaktpolen auf der sonnenabgewandten Rückseite (MWT, IBC)
- » 6-Achs-Roboter für automatisiertes Layup der Solarzellenstrings, Herstellung von Rückkontaktmodulen mit leitfähiger Rückseitenfolie, Dispensprozesse, Pick-and-Place-Aufgaben und kontrollierte UV-Aushärtung
- » 3D-Röntgencomputertomographie
- » Zwei Laminatoren in industriellem Maßstab für Einkapselungsprozesse von Solarzellen, adaptiert für dickere Aufbauten und sphärisch gewölbte Module
- » Digitalmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie für die Analyse von Fügestellen
- » Geräte zur mechanischen Charakterisierung von Modulmaterialien (statisch und dynamisch) sowie zur Adhäsionsprüfung
- » Elektrolumineszenz und Gelgehaltsanalyse für die Qualitätsbestimmung von Produktionsprozessen



## Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center

Maike Wiesenfarth M. Sc. | Telefon +49 761 4588-5470

Unsere Aktivitäten zu Konzentratormodulen fassen wir im Con-TEC zusammen. Hier entwickeln wir neue Generationen von hoch- und niedrigkonzentrierenden PV-Modulen und testen Komponenten und Produktionsprozesse. Weitere Forschungsschwerpunkte liegen in der Zuverlässigkeit und in der Materialanalytik. Auf semiautomatischen Produktionsanlagen haben wir bereits linsenbasierte FLATCON®-Module mit Wirkungsgraden von bis zu 36,7 % (CSTC) demonstriert. Wir unterstützen Unternehmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette der konzentrierenden Photovoltaik.

Im Con-TEC nutzen wir unsere produktionsnahen Fertigungsprozesse, um Konzentratormodule mit höchster Effizienz zu produzieren und Wege zur Kostenreduktion aufzuzeigen. Wir stellen Prototypen in Kleinserien her, um neue Komponenten, Designs und Prozesse zu evaluieren. Einzigartig sind auch unsere Möglichkeiten und Erfahrungen in der Auswahl und Ver-

arbeitung von optischen Silikonem, die wir für die Herstellung von Optiken, zur optischen Ankopplung von Sekundäroptiken oder Verkapselung von Solarzellen nutzen.

Ein weiterer Forschungsschwerpunkt ist die Untersuchung der Zuverlässigkeit einzelnen Baugruppen. In der Konzentratorphotovoltaik ist besonders die thermische Anbindung der Solarzelle an das Substrat entscheidend, da durch die konzentrierte Strahlung sehr hohe Energieströme übertragen werden. Zur Untersuchung der Langzeitstabilität der Module oder Komponenten werden beschleunigte Alterungstests durchgeführt.

**1** *Ausricht- und Fügeanlage für die präzise Montage der Bodenplatte und der Linsenplatte eines Konzentratormoduls.*

### Technische Ausstattung

- » Hochpräzise Bestücker von Solarzellen und Baugruppen auf kleinen und großen Flächen (klein: <math>< 250 \times 300 \text{ mm}^2</math> mit Setzgenauigkeit - » Lötten unter Luft- oder Stickstoffatmosphäre, kontrolliertes Aushärten von Leitklebern
- » Vakuumlöten von Flächen bis zu - » Lötten ohne Flussmittel mit Ameisensäure oder Formiergas-Aktivierung
- » Dünn- und Dickdrahtbonder für Gold- und Aluminiumdrähte
- » Anlage zur Ausrichtung der Primäroptik zur Solarzelle
- » Dispenseinheiten für das Auftragen von Klebern und dickflüssigen Montagematerialien
- » Koordinatenmessplatz MarVision OMS 1000/350 mit großem Messbereich (- » Abzugs- und Schertester Dage Series 4000
- » Klimakammern zur Auslagerung unter Temperatur oder Temperaturwechseln mit oder ohne zusätzlicher Beanspruchung durch erhöhte Luftfeuchtigkeit, Test von Solarzellenbaugruppen mit angelegter Rückwärts- spannung und Bestrahlung von optischen Komponenten oder Verkapselungsmaterialien mit konzentrierter UV-Bestrahlung

# IMPRESSUM

## Redaktion

Christina Lotz, Karin Schneider (verantwortlich)

## Anschrift der Redaktion







Fraunhofer-Institut für  
Solare Energiesysteme ISE  
Presse und Public Relations  
Heidenhofstraße 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](http://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien)

© Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Freiburg, 2018

## Hier halten wir Sie auf dem Laufenden

-  [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)
-  [blog.innovation4e.de](http://blog.innovation4e.de)
-  <https://plus.google.com/107019964248628253357>
-  Twitter: FraunhoferISE
-  Facebook FraunhoferISE
-  <https://www.youtube.com/channel/UCSXRQLUtU3WhmVBj4BvOYQg>

## Gestaltung und Druck

netsyn, Joachim Würger, Freiburg  
[www.netsyn.de](http://www.netsyn.de)

## Bildnachweise

Fraunhofer-Gesellschaft S. 8  
Fraunhofer CSP S. 9  
G.tecz Engineering GmbH S. 19, Abb. 2  
ingenhoven architects / H.G. Esch S.19, Abb. 3  
European Union 2012, PVGIS (map) / topae/Shutterstock  
(truck) S. 42  
Meteosat Second Generation (EUMETSAT) S. 43, Abb. 1  
hfzimages/Shutterstock S. 58/59  
Stadt Kaiserslautern S. 63  
University of Freiburg/srp. S. 79, Abb. 2  
BW+P Architekten S. 73

## Fotografen

Auslöser Fotodesign Kai-Uwe Wuttke: S. 1, S. 6, S. 21  
Michael Eckmann: S. 40/41, S. 66, Abb. 1 und 2, S. 69, S. 70  
Joscha Feuerstein: S. 54/55  
Aleksander Filipovic: S. 65  
Sigrid Gombert: S. 67  
Anna Heimsath: S. 46/47  
Guido Kirsch: S. 11/12  
Dirk Mahler: Titelbild, S. 3, S. 24/25, S. 32/33, S. 35, S. 38,  
S. 72, S. 80  
Dr. Marek Miara: S. 64  
Maria Parussel und Holger Vonder: S. 74, Abb. 2  
Christian Schumacher: S. 44/45  
Timo Sigurdsson: S. 75, S. 78

# VERANSTALTUNGEN 2018

MIT BETEILIGUNG DES FRAUNHOFER ISE

**Zukünftige Stromnetze für Erneuerbare Energien**  
*Berlin, 30.–31.01.2018*

**E-World**  
*Essen, 06.–08.02.2018*

**EnInnov 2018**  
*Graz, Österreich, 14.–16.02.2018*

**Battery Experts Forum**  
*Aschaffenburg, 27.02.–01.03.2018*

**ABXPV / PEROPTO**  
*Rennes, Frankreich, 27.02.–01.03.2018*

**9<sup>th</sup> International Rechargeable Battery Expo**  
*Tokio, Japan, 28.02.–02.03.2018*

**Energy Storage Europe**  
*Düsseldorf, 13.–15.03.2018*

**Silicon PV, 8<sup>th</sup> International Conference on Crystalline Silicon Photovoltaics**  
*Lausanne, Schweiz, 19.–21.03.2018*

**TGA-Kongress 2018**  
*Berlin, 22.–23.03.2018*

**Solarex**  
*Istanbul, Türkei, 05.–07.04.2018*

**CSSC-10 – 10<sup>th</sup> International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells**  
*Sendai, Japan, 08.–11.04.2018*

**14<sup>th</sup> International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems (CPV – 14)**  
*Puertollano, Spanien, 16.–18.04.2018*

**SPIE Photonics Europe**  
*Straßburg, Frankreich, 22.–26.04.2018*

**Hannover Messe Industrie**  
*Hannover, 23.–27.04.2018*

**Symposium Photovoltaische Solarenergie 2018**  
*Kloster Banz, Bad Staffelstein, 25.–27.04.2018*

**EnerStock 2018**  
*Adana, Türkei, 25.–28.04.2018*

**Berliner Energietage**  
*Berlin, 07.–09.05.2018*

**IFAT, Messe für Wasser-, Abwasser-, Abfall- und Rohstoffwirtschaft**  
*München, 14.–18.05.2018*

**The Battery Show Europe**  
*Hannover, 15.–17.05.2018*

**12<sup>th</sup> SNEC PV POWER EXPO 2018**  
*Shanghai, China, 27.–30.05.2018*

**HOPV-18**  
*Benidorm, Spanien, 28.–31.05.2018*

**PCIM Europe**  
*Nürnberg, 05.–07.06.2018*

**41<sup>st</sup> IEEE International Conference 2018**  
*Groningen, Niederlande, 10.–13.06.2018*

**45<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference**  
*Waikoloa Village, Hawaii, USA, 10.–15.06.2018*

**Symposium Thermische Solarenergie**  
*Kloster Banz, Bad Staffelstein, 13.–15.06.2018*

**E-MRS Spring Meeting**  
*Straßburg, Frankreich, 18.–22.06.2018*

**Intersolar Europe / Electrical Energy Storage**  
*München, 20.–22.06.2018*

**Electrical Energy Storage North America**  
*San Francisco, USA, 10.–12.07.2018*

**DGWF Jahrestagung**  
*Köln, 05.–07.09.2018*

**Internationale ILIAS Konferenz**  
*Luzern, Schweiz, 06.–07.09.2018*

**Heat Powered Cycles Conference 2018**  
*Bayreuth, 16.–19.09.2018*

**World of Energy Solutions 2018 / f – cell 2018**  
*Stuttgart, 18.–19.09.2018*

**35<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition (EU PVSEC)**  
*Brüssel, Belgien, 24.–28.09.2018*

**4<sup>th</sup> PSCO**  
*Lausanne, Schweiz, 30.09.–02.10.2018*

**Chillventa**  
*Nürnberg, 16.–18.10.2018*

**VDE-Tec Summit 2018**  
*Berlin, 20.–21.11.2018*

**2018 MRS Fall Meeting**  
*Boston, USA, 25.–30.11.2018*