



Jahresbericht  
**2019/20**

*Teil einer neuen Stele am Haupteingang des Fraunhofer ISE, die verschiedene, hocheffiziente BIPV-Module mit patentierter MorphoColor® Farbschicht zeigt. Die MorphoColor® Farbschicht ist eine photonische Struktur, bei der eine Interferenzschicht so mit einem geometrisch strukturierten Substrat kombiniert wird, dass sich ein schmalbandiger Reflexionspeak ergibt. Er reflektiert nur eine bestimmte Farbe und lässt das restliche Sonnenlicht nahezu ungestört passieren. Das Design der Schicht ist durch die Farbschicht auf den Flügeln des Morpho-Schmetterlings inspiriert. Durch die Schmalbandigkeit des Reflexionspeaks bleiben 90 % der Effizienz im Vergleich zu einem schwarzen Modul erhalten. Dies ermöglicht sowohl einen hohen Ertrag als auch die ästhetische Gestaltbarkeit von PV-Fassaden. Die Stele zeigt somit, wie innovative Technologien dazu beitragen können, dass solar aktivierte Gebäudehüllen ein selbstverständliches Element werden, mit dem sich CO<sub>2</sub>-neutrale und architektonisch ansprechende Gebäude gestalten lassen.*

**Jahresbericht**  
**2019/20**

# VORWORT

Der Klimawandel und damit auch die Energiewende haben nicht zuletzt durch die »Fridays for Future«-Bewegung eine neue Dimension der öffentlichen Wahrnehmung erreicht. Aktuelle Schritte politischen Handelns konkretisieren sich mit dem Klimapakete der Bundesregierung. Dass politisches Handeln dringend notwendig ist, bestätigen unter anderem die jüngsten Ergebnisse des IPCC Berichts. Konsequenterweise haben auch wir in der Neuauflage der Studie des Fraunhofer ISE »Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen« das Minimalziel 95 % Reduktion der Treibhausgasemissionen bis 2050, bezogen auf 1990, gesetzt. Die Energiewende benötigt Technologien und Systemlösungen, die wir am Fraunhofer ISE erforschen und entwickeln. So liegt es nahe, dass wir auch mit diesem Jahresbericht auf ein erfolgreiches Jahr sowohl hinsichtlich der Finanzierung als auch des Wachstums zurückblicken können.

Die Photovoltaik ist eine tragende Säule der Energiewende, das ergeben alle Studien. Der in Deutschland benötigte Ausbau auf mindestens 500 GW wird nicht nur auf Dächern und Freiflächen passieren, sondern auch in unserer bebauten Umwelt. Wir sind überzeugt, dass eine viel umfänglichere Integration der Photovoltaik in die verschiedensten Anwendungsbereiche möglich ist. Dem tragen wir mit unserer strategischen Forschungs- und Entwicklungsaktivität »Integrierte Photovoltaik« Rechnung (Seiten 18, 39, 49).

Ebenfalls eine Schlüsselrolle bei der Energiewende kommt der Wärmepumpe zu. Hier arbeiten wir seit Jahren an der gesamten Wertschöpfungskette von Materialien bis zu Wärmepumpentests und Monitoring im Feld. Ein jüngstes Ergebnis unserer Arbeit ist die Entwicklung eines Prototypen mit dem klimafreundlichen Kältemittel Propan für die Aufstellung im Haus (Seite 46).

Die Wasserstofftechnologie nimmt gegenwärtig Fahrt auf, sowohl international als auch in Deutschland. Bei den Aktivitäten der Fraunhofer-Gesellschaft auf dem Gebiet der Wasser-

stofftechnologie nimmt das Fraunhofer ISE eine Schlüsselstellung ein und war wesentlich beteiligt an der Erstellung einer Wasserstoff-Roadmap der Fraunhofer-Gesellschaft, die im Herbst an mehrere Bundesministerien übergeben wurde.

Das Symposium »Geschäftsmodell Energiewende«, ein 2015 unter Federführung des Fraunhofer IEE begonnener Experten-Dialog, wird nunmehr von den Kerninstituten des 2019 neu gegründeten »Fraunhofer Cluster of Excellence Integrierte Energiesysteme CINES« – Fraunhofer IEE, Fraunhofer ISI und Fraunhofer ISE – gemeinsam durchgeführt und im jährlichen Rhythmus in Berlin veranstaltet. Mit einer fundierten, modellbasierten Energiesystemanalyse unterstützt das Cluster die technisch und ökonomisch optimierte Entwicklung eines CO<sub>2</sub>-emissionsfreien Energiesystems, in dem Wärme, Strom und Verkehr gekoppelt sind. Innerhalb des Clusters wird an den dafür notwendigen Strategien, Komponenten und Technologien gearbeitet.

In Freiburg hat das Fraunhofer ISE im Oktober ein Symposium »Dimensionen der Energiewende« veranstaltet, in dessen Mittelpunkt eine transdisziplinäre Podiumsdiskussion von Expertinnen und Experten unterschiedlicher Fachrichtungen stand. Der 60. Geburtstag von Prof. Dr. Hans-Martin Henning war hierfür der Anlass.

Die Fraunhofer-Gesellschaft wurde im vergangenen Jahr 70 Jahre alt. Die fünf in Freiburg angesiedelten Institute haben im Herbst ein Fest in der Innenstadt gefeiert. Rund 5000 Besucherinnen und Besucher trafen auf Fraunhofer-Forschung zum Anfassen und ein unterhaltsames Programm samt Lasershow.

Das Jahr 2019 brachte einen Ausbau der Infrastruktur des Fraunhofer ISE sowie strukturelle und personelle Veränderungen. So war ein Highlight die Einweihung unseres neuen »Zentrums für Leistungselektronik und nachhaltige Netze« im Sommer am Standort Zinkmattenstraße in Freiburg. Mit einem eigenen 110-kV-Hochspannungsanschluss und einer Leistung von 40 MVA verfügt dieses Laborzentrum über eine weltweit



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



einzigartige Forschungsinfrastruktur. So wird es den gestiegenen Anforderungen an die Leistungselektronik als Schlüsseltechnologie der Energiewende gerecht (Seite 60).

Das 2008 gegründete Fraunhofer Center for Sustainable Energy CSE in Boston mussten wir bedauerlicherweise aufgrund schwieriger ökonomischer Randbedingungen schließen. Wir danken an dieser Stelle Dr. Christian Höpfner, dem Leiter des Fraunhofer CSE, für sein außerordentliches Engagement und freuen uns, dass die Mitarbeitenden ihre Arbeiten an anderen Einrichtungen vor Ort fortführen können. Auch die Außenstelle des Fraunhofer ISE in Freiberg, das gemeinsam mit dem Fraunhofer IISB betriebene Technologiezentrum Halbleitermaterialien (THM), erfährt eine einschneidende Veränderung. Die Wafer-Bearbeitung überführen wir vom bisherigen Standort Freiberg an das Center für Silizium-Photovoltaik (CSP) in Halle, die Aktivitäten in Freiberg werden beendet. Auch hier gilt der Dank den Mitarbeitenden vor Ort für die erbrachten herausragenden Leistungen.

Die Anzahl von Wissenschaftlerinnen am Fraunhofer ISE zu erhöhen und Karrierechancen für Frauen auszubauen, ist uns ein wichtiges Anliegen. Wir freuen uns daher sehr, dass wir 2019 unsere Beauftragten für Chancengleichheit beim Start von zwei attraktiven internen Programmen zur Förderung von Wissenschaftlerinnen unterstützen konnten.

Auf der Bereichsleiterebene gab es im vergangenen Jahr zwei Wechsel. Dr. Alexandra Heßling, Bereichsleiterin Business Administration, hat das Fraunhofer ISE aufgrund eines Ortswechsels aus privaten Gründen verlassen. In ihrer kurzen Zeit am Institut hat sie viel bewegt, wofür wir ihr danken. Die Neubesetzung der vakanten Position ist im Fluss. Dr. Olivier Stalter, Bereichsleiter im Bereich »Energietechnologien und -systeme« und Leiter des Geschäftsbereichs »Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme«, hat das Institut für einen Karrierewechsel verlassen. Wir danken auch ihm für seine hervorragende Arbeit. Nach einem intensiven Auswahlverfahren begrüßen wir Prof. Dr. Christof Wittwer als neuen Bereichs-

leiter in dieser Funktion und freuen uns auf die weitere Zusammenarbeit mit ihm als langjährigen Mitarbeiter des Instituts.

Eine Honorarprofessur an der University of Cape Town in Südafrika erhielt Dr. Christopher Hebling, ebenfalls Bereichsleiter im Bereich »Energietechnologien und -systeme« und Leiter des Geschäftsbereichs »Wasserstofftechnologien«. Wir gratulieren ihm ebenso wie Dr. Elke Lorenz, die im Rahmen des Fraunhofer-Attract-Programms mit dem Forschungsschwerpunkt Energiemeteorologie ans Fraunhofer ISE kam, zu ihrer erfolgreichen Habilitation an der Universität Oldenburg.

Und nicht zuletzt freuen wir uns über die Berufung von Dr. Andreas Bett auf die W3-Professur »Solare Energie – Materialien und Technologien« an der Fakultät für Mathematik und Physik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.

Unseren Kuratoren, Auditoren, Stipendiengebern, Ansprechpartnern und Förderern in den Ministerien auf Bundes- und Länderebene und bei den Projektträgern sowie unseren Projektpartnern danken wir herzlich für die Unterstützung und Förderung des Fraunhofer ISE sowie für die gute Zusammenarbeit. Ebenso freuen wir uns auf die weitere Kooperation, um die für den Erhalt eines lebenswerten Planeten Erde so notwendige rasche Transformation unseres Energiesystems zügig voranzutreiben.

Prof. Dr. Hans-Martin Henning

Prof. Dr. Andreas Bett

# INHALTSVERZEICHNIS

<b>Vorwort</b>	<b>2</b>	<b>PHOTOVOLTAIK</b>	<b>20</b>
<b>Organisationsstruktur</b>	<b>6</b>	<b>Silicium-Photovoltaik</b>	<b>22</b>
<b>Kuratorium</b>	<b>7</b>	Inline-Test von Solarzellen: hochflexible Messplattform	24
<b>Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE</b>	<b>8</b>	Hochqualitatives Cast-Mono-Silicium mit SMART-Seeding-Technologie	24
<b>Außenstellen, Kooperationen, Vernetzung</b>	<b>10</b>	Der digitale Zwilling in der Produktion von Solarzellen	25
<b>Preise und Auszeichnungen</b>	<b>11</b>	Feinlinienmetallisierung reduziert Silberverbrauch	26
<b>Das Institut in Zahlen</b>	<b>12</b>	Im Tandem zu höchsten Wirkungsgraden bei niedrigen Kosten	27
<b>Promotionen und Professuren</b>	<b>14</b>	<b>III-V- und Konzentrator-Photovoltaik</b>	<b>28</b>
<b>Mögliche Energiewelten in Deutschland</b>	<b>16</b>	Schnelles Wachstum von III-V-Halbleiterschichten für Solarzellen	30
<b>Integrierte Photovoltaik – Flächen doppelt nutzen</b>	<b>18</b>	Evaluierung der Konzentrator PV-Technologie in Indien	31
		<b>Neuartige Photovoltaik-Technologien</b>	<b>32</b>
		Rolle-zu-Rolle-Prozess für ITO-freie organische Solarmodule	34
		III-V//Si-Dreifachsolarzelle erreicht 34 Prozent Wirkungsgrad	35
		<b>Photovoltaische Module und Kraftwerke</b>	<b>36</b>
		SmartCalc.CTM: Moduloptimierung mit digitalen Zwillingen	38
		PV for Mobility: Solarstrom vom Autodach	39
		Agrophotovoltaik steigert Landnutzungseffizienz deutlich	40
		Performance-Analyse von kommerziellen PV-Kraftwerken	41

<b>ENERGIETECHNOLOGIEN UND -SYSTEME</b>	<b>42</b>	<b>AKKREDITIERTE LABORS</b>	<b>64</b>
<b>Energieeffiziente Gebäude</b>	<b>44</b>	CalLab PV Cells	65
Wärmepumpensysteme für Mehrfamilienbestandsgebäude	46	CalLab PV Modules	66
Klimafreundliche Propan-Wärmepumpe für Innenräume	46	TestLab PV Modules	67
Neues Rathaus Freiburg als Netto-Nullenergiegebäude	47	TestLab Solar Façades	68
Überwachung gebäudetechnischer Anlagen mit KI und Nutzer-Feedback	47	TestLab Solar Thermal Systems	69
Sonnen- und Wärmeschutzschichten für die Membranarchitektur	48	TestLab Heat Pumps and Chillers	70
Europäische Prüfnormen für Heizungsprodukte auf dem Prüfstand	48	TestLab Power Electronics	71
MorphoColor®: Stele zur Demonstration von farbigen BIPV-Modulen	49		
<b>Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse</b>	<b>50</b>	<b>FUE-INFRASTRUKTUR</b>	<b>72</b>
Lebenszyklus-Simulation von solarthermischen Kraftwerken	52	<b>Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze</b>	<b>74</b>
3D-Laserscanning zur Vermessung von Heliostaten im Solarfeld	52	Multi-Megawatt Lab	74
Wärmeübertrager in Latentwärmespeichern charakterisieren	53	Medium Voltage Lab	74
Rückgewinnung von Säuren und Salzen aus Industrieabwässern	53	Power Converters Lab	75
		Smart Energy Lab wird Digital Grid Lab	75
<b>Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeicher</b>	<b>54</b>	<b>Technologieevaluationszentren</b>	<b>76</b>
GIS-basierte Bewertung von Wasserstoff- und PtG-Infrastruktur	56	SiM-TEC – Silicon Material Technology Evaluation Center	76
Life Cycle Assessment von Prozessen zur Sektorenkopplung	57	PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center	76
Versorgung von Inseln durch intelligentes Speicherdesign	58	Module-TEC – Module Technology Evaluation Center	77
Solar gestützte Trocknungs- und Kühlungstechnologie	58	Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center	77
Lithium-Festkörper-Batterien mit Ionenleiter auf Sulfid-Basis	59	<b>Forschungs- und Entwicklungszentren</b>	<b>78</b>
Alterungsuntersuchungen an Lithium-Ionen-Batteriespeichern	59	Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen	78
		Zentrum für Optik und Oberflächenforschung	78
<b>Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme</b>	<b>60</b>	Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien	79
Impedanzspektroskopie von Wechselrichtern	62	Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse	79
Ladesysteme für die Elektromobilität von morgen	62	Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme	80
Ressourcenbewertung für die Energiewende	63	Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe	80
Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem	63	Impressum	81
		Bildnachweise	81
		Veranstaltungen 2020	82



# 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 marktorientierten Geschäftsfeldern:

---

## Photovoltaik

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

---

## Energietechnologien und -systeme

- » Energieeffiziente Gebäude
- » Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse
- » Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeicher
- » Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme

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.: Dr. Peter Schossig, Prof. Dr. Christof Wittwer, Prof. Dr. Christopher Hebling, Prof. Dr. Hans-Martin Henning, Dr. Harry Wirth, Karin Schneider, Prof. Dr. Stefan Glunz, Prof. Dr. Andreas Bett, Dr. Ralf Preu, Jochen Vetter.*

---

## Institutsleitung

Prof. Dr. Hans-Martin Henning | Telefon +49 761 4588-5134  
Prof. 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

Prof. Dr. Christopher Hebling | Telefon +49 761 4588-5195  
Dr. Peter Schossig | Telefon +49 761 4588-5130  
Prof. Dr. Christof Wittwer | Telefon +49 761 4588-5115

---

## Verwaltungsleitung – Business Administration

Dr. Alexandra Heßling (bis September 2019) |  
Telefon: +49 761 4588-0

## Verwaltungsleitung – Facility Management

Jochen Vetter | Telefon +49 761 4588-5214

## Kommunikation

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

# KURATORIUM

Das Kuratorium begutachtet die Forschungsprojekte und berät die Institutsleitung und den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft bezüglich des Arbeitsprogramms des Fraunhofer ISE (Stand: 31.12.2019).

---

## Vorsitzender

### **Burkhard Holder**

VDE Renewables GmbH | Alzenau

---

## Mitglieder

### **Dr. Klaus Bonhoff**

Bundesministerium für Verkehr und Digitale Infrastruktur (BMVI) | Berlin | ehemals 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

### **Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus**

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

### **Sylvère Leu**

Meyer Burger Technology AG | Gwatt | Schweiz

### **Ministerialrat Helge Pols**

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) | Berlin

### **Dr. Norbert Pralle**

Ed. Züblin AG | Stuttgart

### **Dr. Klaus-Dieter Rasch**

ehemaliger Geschäftsführer AZUR SPACE Solar Power GmbH | Heilbronn

### **Prof. Dr. Leonhard Reindl**

Albert-Ludwigs-Universität | Freiburg

### **Dr. Norbert Schiedeck**

Vaillant Group | Remscheid

### **Gabriele Schmiedel**

Siemens AG | Erlangen

### **Dipl.-Ing. Thomas Speidel**

ads-tec GmbH | Nürtingen

### **Prof. Dr. Frithjof Staiß**

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

# DAS FRAUNHOFER-INSTITUT FÜR SOLARE ENERGIESYSTEME ISE

Das 1981 in Freiburg im Breisgau gegründete Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE ist mit 1269 Mitarbeitenden (870 Vollzeitäquivalent) 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 89 % durch Aufträge in den Bereichen angewandte Forschung, Entwicklung und Hochtechnologie-Dienstleistungen. Das Fraunhofer ISE ist nach der Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001:2015 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 PV-Technologien
  - » Photovoltaische Module und Kraftwerke
- » Geschäftsfeld Energieeffiziente Gebäude
- » Geschäftsfeld Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse
- » Geschäftsfeld Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeicher
- » Geschäftsfeld Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme

---

## Serviceleistungen in akkreditierten Labors

Das Fraunhofer ISE verfügt über sieben akkreditierte Test- und Kalibriereinrichtungen, in denen es unabhängige Prüf- und Zertifizierungsleistungen durchführt. Die akkreditierten Labors bieten mit ihrer jeweiligen Mess- und Prüfausstattung umfangreiche Services für Unternehmen und wissenschaftliche Einrichtungen an:

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





1

## Angebotspektrum

Das Fraunhofer ISE entwickelt durch seine Forschungsaktivitäten 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

## FuE-Infrastruktur

Das Fraunhofer ISE zeichnet sich durch seine hervorragende technische Infrastruktur aus. Knapp 17 000 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 sieben Laborzentren sowie vier produktionsnahe Technologieevaluationszentren:

- » Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen
- » Zentrum für Optik und Oberflächenforschung
- » Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse
- » Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien
- » Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme
- » Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe
- » Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze
- » 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

# AUSSENSTELLEN, KOOPERATIONEN, VERNETZUNG



Neben dem Hauptsitz in Freiburg unterhält das Fraunhofer ISE zwei Außenstellen, eine davon gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS in Halle. Das Institut ist an einer internationalen Kooperation in Südamerika direkt beteiligt und unterhält Memorandums of Understanding mit 57 Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Organisationen weltweit. Unter anderem ist es Mitglied im Forschungsverbund Erneuerbare Energien (FVEE), der European Research Alliance (EERA), der European Technology and Innovation Platform (ETIP) und der Association of European Renewable Energy Research Centres (EUREC). Gemeinsam mit dem National Renewable Energy Laboratory NREL in den USA und dem National Institute of Advanced Industrial Science and Technology AIST in Japan bildet es die Global Alliance of Solar Research Institutes (GA-SERI).

## Außenstandorte des Fraunhofer ISE

- » Fraunhofer ISE Labor- und Servicecenter LSC in Gelsenkirchen: Entwicklung von transparenten Elektroden auf der Basis von Nanodrähten und Messtechnik für die Photovoltaik
- » Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP, Halle/Saale: Kristallisationstechnologie, Recycling von PV-Modulen

## Internationale Kooperationen

- » Fraunhofer Chile Research – Centro para Tecnologías en Energía Solar (FCR-CSET), Santiago, Chile: Solare Stromerzeugung, Solarthermie, Aufbereitung von Wasser und Prozesswärme

## Fraunhofer-Allianz Energie

Das Fraunhofer ISE ist nicht nur eines der derzeit 18 Mitgliedsinstituten der Fraunhofer-Allianz Energie, sondern seit ihrer Gründung im Jahr 2003 auch Sitz der Geschäftsstelle. Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning ist Sprecher der Allianz. Als einer der größten Energieforschungsverbände Europas bietet die Fraunhofer-Allianz Energie Forschungs- und Entwicklungsdienstleistungen in den Geschäftsfeldern Energie Erneuerbar, Energie Speicher, Energie Effizient, Energie Digital, Energie System und Energie Urban.

## Weitere Vernetzung in der Fraunhofer-Gesellschaft

- » Fraunhofer-Allianzen Batterien, Bau, Space, SysWasser
- » Cluster of Excellence Integrierte Energiesysteme CINES
- » Fraunhofer Systemforschung Elektromobilität
- » Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS
- » Fraunhofer-Netzwerke Intelligente Energienetze, Nachhaltigkeit, Windenergie
- » »Morgenstadt-Initiative« der Fraunhofer-Gesellschaft

## Leistungszentrum Nachhaltigkeit in Freiburg

Das 2015 gegründete transdisziplinäre Forschungsnetzwerk wird von der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und den fünf Fraunhofer-Instituten vor Ort betrieben. 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 Nachhaltige Technische Systeme (INATECH)« an der Universität Freiburg mit seinen Schwerpunkten Nachhaltige Materialien, Energiesysteme und Resilienz.

<sup>1</sup> Das Centro para Tecnologías en Energía Solar (FCR-CSET) in Santiago de Chile setzt Schwerpunkte bei Solarer Stromerzeugung, Solarthermie, Aufbereitung von Wasser und Prozesswärme.



# PREISE UND AUSZEICHNUNGEN



**Dr. Michael Hermann** | »FASSADENPIXEL – Autonom kletternde Solarernteroboter« | 3. Platz | Ideenwettbewerb »Was ist deine Moonshot-Vision?« | Fraunhofer-Gesellschaft | 26.–27.02.2019 | München

**Stefan Brachmann** | Ausbildungsverantwortung | Fraunhofer Ausbildungspreis 2018 | Fraunhofer-Gesellschaft | 01.03.2019 | Freiburg

**Sönke Rogalla, Sebastian Schlick, Florian Ackermann** | 1. Posterpreis | »Impedanzspektroskopie von Wechselrichtern – Ein neues Verfahren zur Bestimmung von Oberschwingungen« | Symposium Photovoltaische Solarenergie | 19.–21.03.2019 | Bad Staffelstein

**Sebastian Tepner** | Best Paper Award | »Improving Wall Slip Behavior on Screen Emulsions for Fine Line Screen Printing« | SiliconPV 2019 | 11.04.2019 | Leuven | Belgien

**Dr. Frank Feldmann** | 2. Platz Best Paper Award | »Studying Dopant Diffusion from Poly-Si Passivating Contacts« | SiliconPV Awards 2019 | 11.04.2019 | Leuven | Belgien

**Dr. Tim Niewelt, Regina Post, Dr. Florian Schindler, Dr. Wolfram Kwapil, Dr. Martin C. Schubert** | Poster Award 2019 | »Investigation of LeTID where we can control it – Application of FZ Silicon for Defect Studies« | SiliconPV 2019 | 10.04.2019 | Leuven | Belgien

**Matthias Haid, Cornelius Armbruster, David Derix, Christian Schöner, Dr. Henning Helmers** | Paper Award | »5W Optical Power Link with Generic Voltage Output and Modulated Data Signal« | OWPT2019 | 23.–25.04.2019 | Yokohama | Japan

**Monika Bosilj** | Vortrag »Sustainable Hydrothermal Carbons for Biorefinery-related Catalysis« | Session »Young Scientist Forum« | World Chemistry Forum | 22.–24.05.2019 | Barcelona | Spanien

**Dr. Korbinian Kramer** | Mission Innovation Champion | Internationale Umweltministerkonferenz der Initiative Mission Innovation | 28.04.2019 | Vancouver | Kanada

**Nikolas Köppel** | TUM Energy Best Poster Award 2019 | »Environmental Performance of Synthetic Fuel« | Kolloquium »Shaping a Sustainable Energy Future« | 01.08.2019 | München

**Bernd Steinhauser** | Best Poster Awards Bereich Silicon PV | »Life(time) at the Limits – Very High Lifetimes in Crystalline Silicon Measured by Photoconductance and Photoluminescence« | EU PVSEC 2019 | 13.09.2019 | Marseille | Frankreich

**Christoph Luderer** | Best Poster Awards Bereich Silicon PV | »Transport Losses at the TCO/a-Si:H/c-Si Heterojunction: Influence of Different Layers and Annealing« | EU PVSEC 2019 | 13.09.2019 | Marseille | Frankreich

**Laura Mundt** | Eva-Mayr-Stihl-Nachwuchsförderpreis 2019 | Albert-Ludwigs-Universität | 23.10.2019 | Freiburg

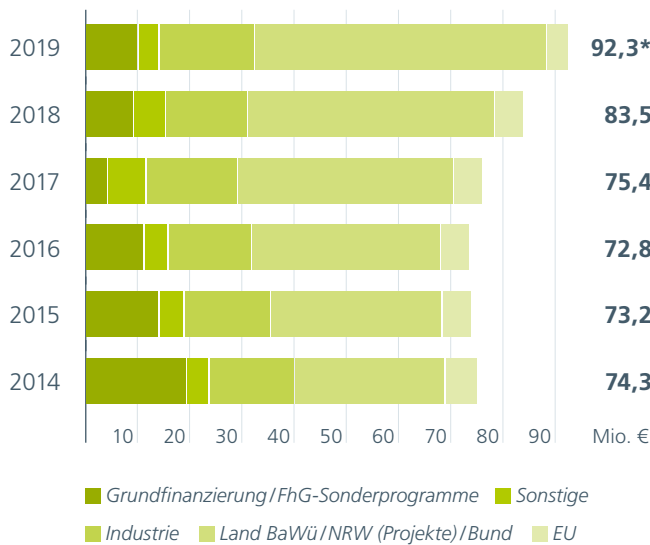
**Jan Wienold, Jens Christoffersen** | Best Research Paper 1998–2007 | »Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environment with the use of CCD cameras« | Journal Energy and Buildings

**Marco Glatz** | »Ehrung der Besten 2019« | Fraunhofer-Gesellschaft | Bachelorarbeit als Dualer Student »Charakterisierung und Weiterentwicklung von Diffusionsprozessen zur Ausbildung Bor-dotierter Emitter in n-Typ Siliciumsolarzellen« | 25.–27.11.2019 | München

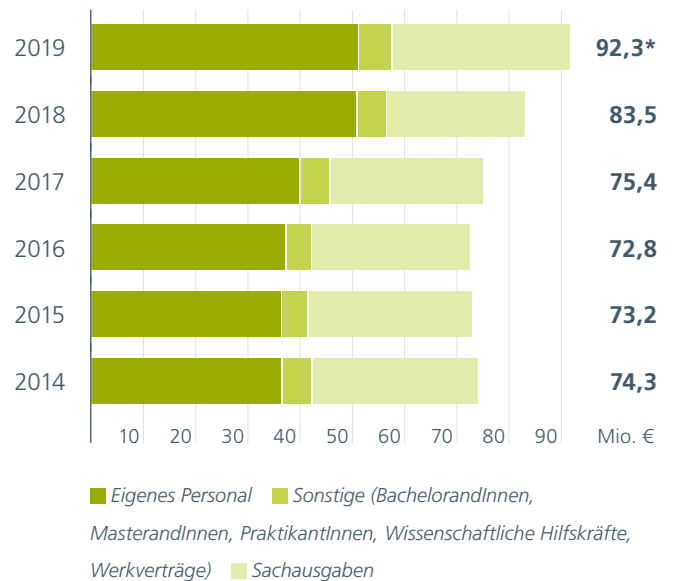
<sup>1</sup> *Dr. Korbinian Kramer wurde auf der Internationalen Umweltministerkonferenz in Vancouver als »Mission Innovation Champion« ausgezeichnet.*

# DAS INSTITUT IN ZAHLEN

## Entwicklung der Erträge\*\*

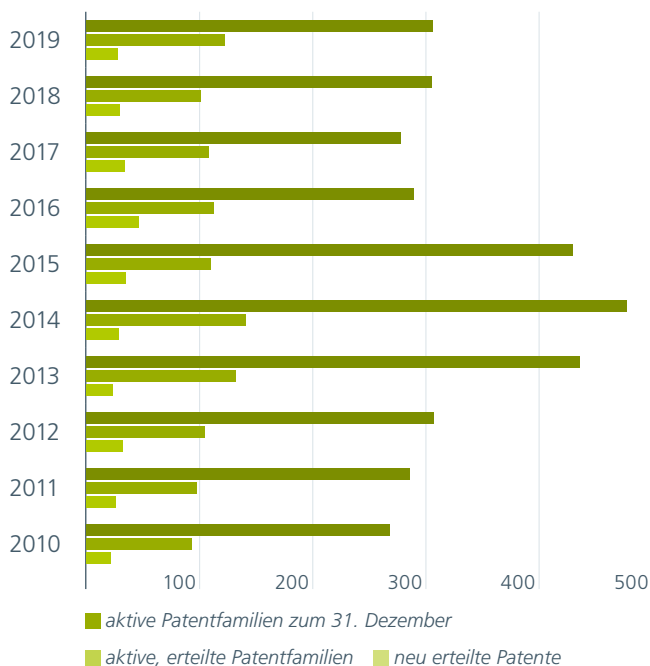


## Entwicklung der Ausgaben\*\*



\* vorläufig \*\*ohne Investitionen – Der Gesamthaushalt 2019 (inkl. Investitionen) betrug 102,6 Mio. €.

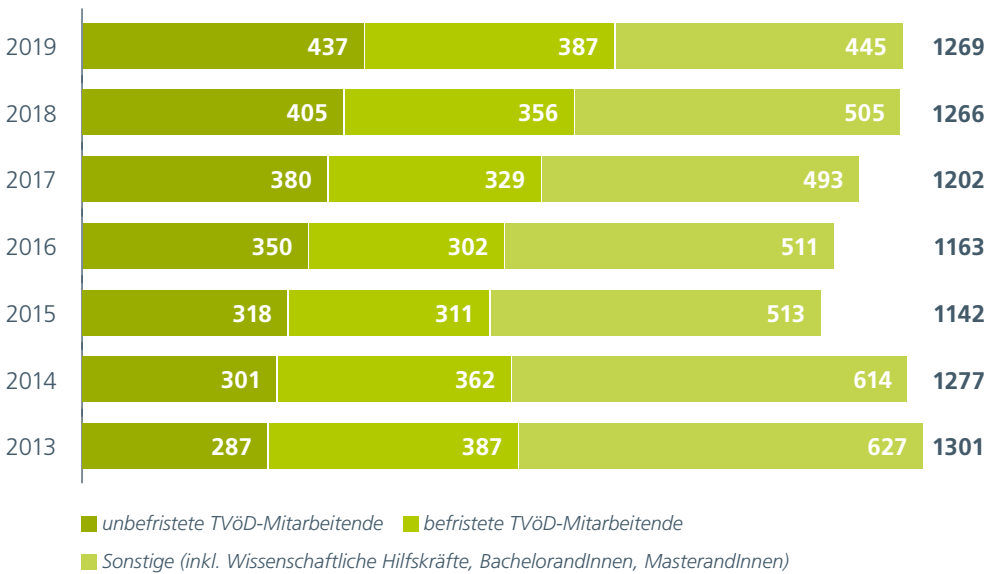
## Patente



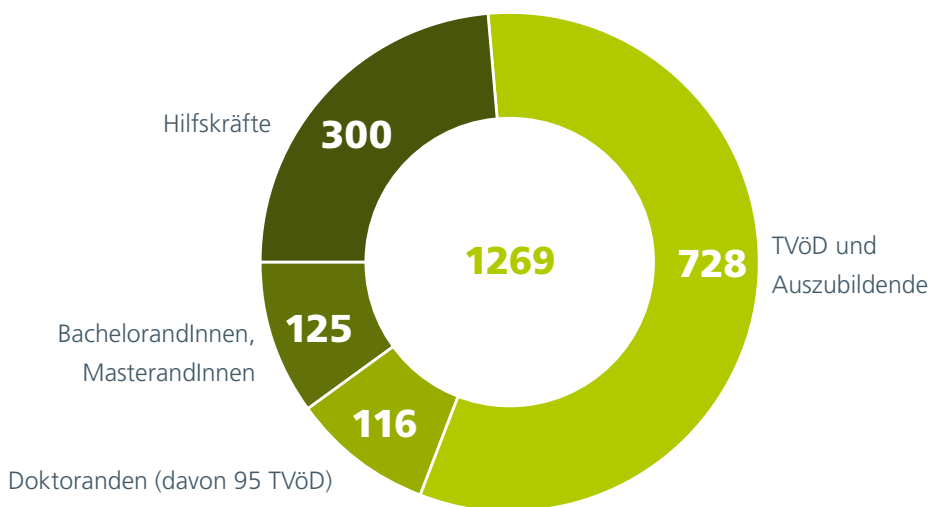
## Lehrveranstaltungen

- 57** Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- 5** Hochschule Offenburg
- 1** KIT Karlsruher Institut für Technologie
- 1** Martin-Luther Universität Halle-Wittenberg
- 1** Universität Koblenz-Landau
- 2** TH Georg Agricola Bochum
- 1** Ruhr Universität Bochum
- 48** WissenschaftlerInnen des Fraunhofer ISE sind neben ihrer Forschungsarbeit auch in der Lehre tätig.

Entwicklung der Mitarbeiterzahlen



Personalstruktur



# PROMOTIONEN UND PROFESSUREN

## **Phillipp Bendix**

»Beschichtung von Sorptionsmaterialien« |  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg | 2019

## **Gregor Bern**

»Bildverarbeitendes Regelungssystem für Heliostatenfelder« |  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | 2019

## **Andreas Büchler**

»Interface Study on Laser-Structured Plated Contacts  
for Silicon Solar Cells« |  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg | 2019

## **Verena Fluri**

»Wirtschaftlichkeit von zukünftigen Geschäftsmodellen  
dezentraler Stromspeicher« |  
Europa-Universität Flensburg | 2019

## **Hannes Fugmann**

»Optimierter Wärmeübergang und Druckverlust in der  
Wärmeübertragung durch Verwendung von Drahtstrukturen« |  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | 2019

## **Georg Hagelstein**

»Untersuchung zum Kristallisationsverhalten in  
n-Octadecan-Wasser-Dispersionen« |  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg | 2019

## **Patricia Krenckel**

»Analyse struktureller Defekte in Siliciumkristallen aus  
gerichteter Erstarrung mit Keimvorgabe« |  
Universität Konstanz | 2019

## **Harry Kummer**

»Adsorptive Coating Systems based on Hybrid Siloxane  
Binders for Heat Transformation Applications« |  
Universität Leipzig | 2019

## **Mathias List**

»Advanced Electrical and Optical Characterization of  
Recombination in Organic Solar Cells« |  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg | 2019

## **Thorsten Müller-Eping**

»Tensordekomposition qualitativer Modelle zur Fehler-  
erkennung – Anwendung in der Gebäudeautomation« |  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | 2019

## **Laura Mundt**

»High-Resolution Analysis of Perovskite Absorbers in  
Photovoltaics« |  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg | 2019



### **Markus Niemeyer**

»Entwicklung von metamorphen Mehrfachsolarzellen mit vier pn-Übergängen auf einem Germaniumsubstrat« | Technische Universität Ilmenau | 2019

### **Thore Oltersdorf**

»Auslegung und experimentelle Untersuchung eines 3-Fluid-Wärmeübertragers für Mehrquellen-Wärmepumpensysteme« | Technische Universität Hamburg-Harburg | 2019

### **Jose Eduardo Ruiz Rosero**

»Precursors Evaluation for GaInNAs Growth by MOVPE Technique for Solar Cells Production« | Pontifical Catholic University of Rio de Janeiro | 2019

### **Shivenes Shammugam**

»Raw materials and energy transformation process – Analysis of supply bottlenecks and implications on metal markets« | Universität Augsburg | 2019

### **Peter Schöttl**

»Optical and Thermo-Hydraulic Simulation and Optimization of Solar Tower Receivers« | Technische Universität München | 2019

### **Annette Steingrube**

»Sozio-ökonomische Modellierung des Ausbaus erneuerbarer Energien in Privathaushalten am Beispiel Photovoltaik und Heizungssysteme« | Albert-Ludwigs-Universität Freiburg | 2019

### **Philip Sterchele**

»Analysis of Technology Options to Balance Power Generation from Variable Renewable Energy« | Albert-Ludwigs-Universität Freiburg | 2019

### **Jessica Thomsen**

»Modeling and Evaluation of Regional Electricity Systems with High Shares of Renewable Energy and Flexibility Technologies« | Universität Duisburg-Essen | 2018

### **Andreas Velte**

»Experimentelle Arbeiten und Entwicklung von numerischen Modellen zur Analyse und Optimierung von erweiterten Adsorptionskreisläufen für die Wärmeversorgung von Gebäuden« | Albert-Ludwigs-Universität | Freiburg | 2019

### **Kübra Yasaroglu Unal**

»Preparation of a TiO<sub>2</sub> porous layer by molding of polymer beads for perovskite solar cell applications« | Albert-Ludwigs-Universität Freiburg | Universität Straßburg | 2019

---

## **Professur und Habilitation**

### **Dr. Andreas Bett**

Ruf auf die W3-Professur »Solare Energie – Materialien und Technologien« an der Fakultät für Mathematik und Physik der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg | 2020

### **Dr. Christopher Hebling**

Honorarprofessor im Bereich Chemieingenieurwesen an der Fakultät für Ingenieur- und Bauwesen | University of Cape Town (UCT) | Kapstadt | Südafrika

### **Dr. Elke Lorenz**

Habilitation »Solar Irradiance Forecasting for System Integration of Solar Energy« | Carl von Ossietzky Universität Oldenburg | 2019

<sup>1</sup> Ehrung der Promovierten im Rahmen der Jahresversammlung 2019 des Fraunhofer ISE: v.l.n.r. Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning, Hannes Fugmann, Annette Steingrube, Markus Niemeyer, Gregor Bern, Andreas Velte, Peter Schöttl, Harry Kummer, Sebastian Johannes Ernst (2018), Sebastian Nold (2018), Thore Oltersdorf, Mathias List, Thorsten Müller-Eping, Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Bett.

# MÖGLICHE ENERGIEWELTEN IN DEUTSCHLAND

**In Anknüpfung an die 2015 veröffentlichte Studie zur Energiewende auf Basis des Fraunhofer ISE Rechenmodells »REMod« ist jetzt eine Neuauflage erschienen, die in verschiedenen Szenarien kostenoptimale Transformationspfade für das deutsche Energiesystem aufzeigt. Anders als in der ersten Studie ist hier von »konsistenten Energiewelten« die Rede, was ist damit gemeint?**

**Henning:** Während wir in der Vorläuferstudie einen rein technisch-ökonomischen Ansatz gewählt hatten, um kostenoptimierte Pfade für die Energiewende aufzuzeigen, beziehen wir in die jetzige Betrachtung mit ein, dass die Energiewende ja ganz stark ein gesellschaftliches Projekt ist. So erzählen wir in dieser Studie quasi Geschichten von unterschiedlichen »Energiewelten«. Beispielsweise könnte sich die Energiewende so entwickeln, dass das Gros der Bevölkerung nicht bereit ist, gewohnte Verhaltensweisen wesentlich zu ändern und auch entsprechende Anreize nicht wirklich wirksam werden. Dies hätte beispielsweise zur Folge, dass Gaskessel nicht in großem Umfang durch Wärmepumpen ersetzt werden oder dass auch hinsichtlich der Mobilität weite Teile der Bevölkerung ein bewahrendes Verhalten zeigen und sich kein schneller und umfassender Wandel vollzieht. In der Studie beschreiben wir, welche Auswirkungen dies auf die Entwicklung der Infrastruktur, auf den Import erneuerbarer Energieträger und auf die Kosten hat, unter der weiterhin gültigen Annahme, dass die deutschen Klimaziele erreicht werden. Eine andere »Energiewelt«, die wir betrachtet haben, ist durch Suffizienz charakterisiert, also ein Verhalten, in dem Konsumverzicht ein Stück weit stattfindet oder es zumindest zu keinem weiteren Zuwachs an Wohnfläche, an Fahrzeugen kommt und Effizienz in der Nutzung von Energie eine wichtige Rolle spielt. Ein weiteres Szenario ist eines, in dem große Widerstände gegen Infrastrukturveränderung bestehen bleiben, das betrifft besonders den Ausbau von Windenergie und Stromnetzen. Zu all diesen Szenarien betrachten wir dann auch die Implikationen im Vergleich zu einer aus Kostensicht optimalen Entwicklung, die keine Rücksicht nimmt auf derartige gesellschaftliche Rahmenbedingungen.

**Anders als die erste Studie setzen die neuen Szenarien als Minimalziel 95 % CO<sub>2</sub>-Reduktion. Auch die Elektrifizierung unseres Energiesystems und das Ausbauvolumen für die Photovoltaik wurde nach oben verändert. Warum?**

**Bett:** Im Grunde haben wir vor fünf Jahren schon geahnt, dass der Ansatz einer Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen um 80 % bis 2050, bezogen auf das Jahr 1990, nicht ausreichen wird. Die jüngeren Rechnungen des IPCC zeigen jetzt aber ganz deutlich, dass dies nicht genügt und dass man mindestens 95 % als Zielwert anstreben muss. Was den Bedarf angeht, so muss man klar konstatieren, dass wir trotz Energieeffizienz mehr elektrische Energie brauchen werden, im Jahr 2050 im Vergleich zu heute die doppelte Menge an Energie – also rund 1000 bis 1200 TWh. In unserem ursprünglichen Modell sind wir noch von einem gleichgewichtigen Kapazitätsausbau für Wind und Sonne ausgegangen. In der aktuellen Studie setzen wir uns unter anderem mit der Frage auseinander, ob und mit welchen Folgen ein weniger starker Ausbau bei Wind durch PV kompensiert werden kann, und wir kommen zu dem Schluss, dass dies möglich ist. In diesem Fall würde sich der Ausbau der PV auf 500 GW belaufen.

**Wie kann man denn 500 GW Photovoltaik in Deutschland installieren und bei einer Spitzenlast von 80 GW in das System integrieren?**

**Bett:** Man muss diese Photovoltaik-Mengen nicht ausschließlich auf Dächern und Freiflächen unterbringen, das könnte auch Akzeptanzfragen aufwerfen. Es gibt aber vielfältige Möglichkeiten, PV in unsere bebaute Umwelt zu integrieren, also ohnehin bereits genutzte Flächen doppelt zu nutzen. Am Fraunhofer ISE haben wir dazu mit der Integrierten Photovoltaik eine große Aktivität gestartet: Wir entwickeln Module beispielsweise für die Gebäudeintegration, für Fahrzeugdächer, PV-Kraftwerke auf Gewässern und die Agro-PV (Seiten 18–19). Und natürlich muss man bei einem verstärkten PV-Zubau auch die Konsequenzen für die systemische Integration betrachten. Dabei spielen unter anderen Fragen der Aus-





richtung der PV-Anlagen, der Flexibilisierung in der Nutzung und selbstverständlich auch der Speicher eine Rolle.

### **Warum werfen Sie bei den Transformationsrechnungen ein besonderes Licht auf die Jahre 2030 und 2050?**

**Henning:** Je näher Ziele liegen, desto drängender und wesentlicher sind sie für die unmittelbare Umsetzung. Nachdem klar ist, dass das 40-%-Reduktionsziel für 2020 aller Voraussicht nach nicht erreicht werden wird, ist für die Politik nun das nächste Dekadenziel in 2030 von zentraler Bedeutung. Das Zwischenziel 2030 hat aber auch deshalb eine hohe Relevanz, weil heute schon Weichen gestellt werden müssen, die stark davon abhängen, ob für 2050 eine 80-%- oder eine 95-%-Reduktion der Emissionen angestrebt wird.

### **Welche Rolle spielt der Wasserstoff, in der Mobilität und darüber hinaus?**

**Bett:** Ich denke, dass wir für die nachhaltige Mobilität sowohl rein Batterie betriebene Fahrzeuge als auch Brennstoffzellenfahrzeuge brauchen werden. An dieser Stelle sei auf eine [Studie zum Lebenszyklus](#) beider Mobilitätsformen hingewiesen. Für den Schwerlastverkehr gibt es die Möglichkeit, auf Basis von Wasserstoff synthetische Brennstoffe herzustellen und auch diese Form der Mobilität zu versorgen, also den Flugverkehr, Schiffe, LKWs. Der Wasserstoff nimmt eine Schlüsselposition im Gesamtsystem ein, als Vermittler zwischen den Sektoren. Er dient als Speicher für elektrische Energie, kann aber auch für Wärme genutzt werden und in der Mobilität. Ein hoch relevantes Einsatzgebiet für Wasserstoff ist auch die Nutzung in der Industrie, vor allem der chemischen und der Stahlindustrie. Die Bundesregierung hat sich jüngst auf den Weg gemacht, eine Wasserstoff-Strategie zu entwickeln. In diesem Kontext hat das Fraunhofer ISE gemeinsam mit dem Fraunhofer ISI und weiteren Instituten eine Fraunhofer Wasserstoff-Roadmap veröffentlicht. Die vielfältige Einsetzbarkeit des Wasserstoffs und die Tatsache, dass er tatsächlich später vielleicht am kostengünstigsten hergestellt werden kann in wind- und sonnenrei-

chen Regionen, führt uns dann – auch wenn uns die deutsche Energiewende am Herzen liegt – in die Dimension der globalen Umsteuerung unserer Energieversorgung.

### **Der Gebäudebereich verursacht heute noch einen beträchtlichen Teil der CO<sub>2</sub>-Emissionen. Welche Wege führen zu einer emissionsfreien Wärme- und Kälteversorgung?**

**Henning:** Für den Gebäudebereich stehen uns grundsätzlich zwei zentrale Ansätze zur Verfügung: durch energetische Sanierung den Energiebedarf besonders für Raumwärme zu senken und die verbleibende Energie erneuerbar bereitzustellen. Wärmepumpen spielen dabei eine wichtige Rolle, aber auch Wärmenetze erweisen sich in den Rechnungen als sinnvoll. Sie können ein »Enabler« für urbanes Energiemanagement sein, in die Wärme aus unterschiedlichsten Quellen eingespeist werden kann, von Großwärmepumpen über große Kraftwärmekopplungsanlagen bis hin zu Solarthermie und Abwärme aus der Industrie. Natürlich ergeben sich hier noch viele weitergehende Möglichkeiten der Solarenergienutzung, wenn es gelingt, die Gebäudehülle in großem Maße zu »solarisieren«.

### **Wann werden wir in Deutschland in einer vollständig defossilisierten Energiewelt leben?**

**Bett:** Technisch könnte man die Klimaneutralität sicher bis 2035 umsetzen, das Fraunhofer ISE liefert hierfür Entwicklungen auf der ganzen Bandbreite. Aber gesellschaftspolitisch ist das, glaube ich, nicht realistisch. Deswegen: frühestens 2050.

**Henning:** Bis 2050 eine klimaneutrale Energieversorgung zu erreichen ist ambitioniert. Wir sollten dies aber unbedingt anstreben – zumal die Dringlichkeit eher steigt, da sich nach Aussagen der Klimawissenschaft die bisherigen Prognosen der Emissionswirkungen eher als zu konservativ erweisen.

1 *Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning.*

2 *Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Bett.*

# INTEGRIERTE PHOTOVOLTAIK – FLÄCHEN DOPPELT NUTZEN



Um die Energiewende mit bis zu 100 % CO<sub>2</sub>-Vermeidung in allen Sektoren zu realisieren, muss die installierte Photovoltaik (PV) in Deutschland verzehnfacht werden auf ca. 500 Gigawatt. Dies ist machbar, wenn der PV-Ausbau nicht nur auf Dächern und Freiflächen, sondern auch integriert in unsere bereits bebaute Umwelt stattfindet. Im Geschäftsfeld »Photovoltaik« hat das Fraunhofer ISE daher 2019 einen strategischen Fokus auf die Integrierte Photovoltaik gelegt und damit mehrere bereits vorhandene Kompetenzen und Aktivitäten gebündelt. Die Integrierte Photovoltaik bietet vielfältige Anwendungen und erschließt ein riesiges Flächenpotenzial für die Solarstromgewinnung, von der bauwerkintegrierten PV über Fahrzeughüllen oder schwimmender PV auf Gewässern bis zur PV in Verkehrswegen und der Agrophotovoltaik, die mit aufgeständerten Modulen auf Agrarflächen eine doppelte Landnutzung erlaubt – Kartoffel- oder Getreideernte und Solarstromernte auf einer Fläche. Allein die bauwerkintegrierte und die Agrophotovoltaik haben in Deutschland ein technisches Potenzial von jeweils über 1 Terawatt Leistung. Integrierte PV schafft sogar an vielen Stellen Synergieeffekte, etwa Reichweitengewinne für Elektrofahrzeuge oder Lärmschutz an Straßen und Schienen. Durch die Erzeugung des Solarstroms nahe am Verbraucher bzw. an Bord von Fahrzeugen reduziert sich außerdem die Nutzung des Stromnetzes.

Für die Integration von PV-Modulen hat das Fraunhofer ISE Technologien entwickelt, die frei wählbare Modulformate und -farben ermöglichen und auch besondere Anforderungen wie reduziertes Flächengewicht, hohe Ästhetik oder extreme mechanische Belastbarkeit erfüllen. Das Fraunhofer ISE entwickelt Lösungen für vielfältige Anwendungen und Kunden.

---

## **Bauwerkintegrierte PV (Building-Integrated PV, BIPV)**

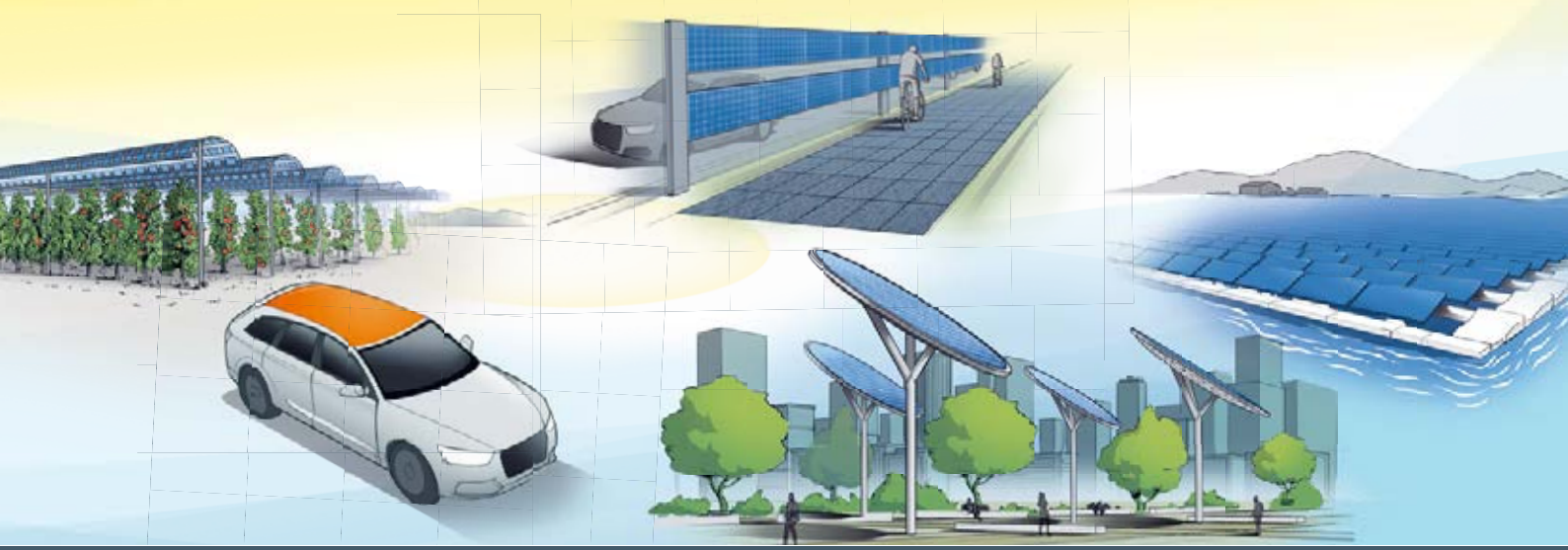
Bei der bauwerkintegrierten PV (BIPV) übernehmen die Bauelemente zusätzlich zur Stromgewinnung weitere Funktionen wie Wärmedämmung, Wind-, Lärm- und Wetterschutz und setzen auch gestalterische Akzente. BIPV leistet so einen signifikanten Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Reduktion von Gebäuden. Das Fraunhofer ISE hat flexible Formate, hocheffiziente Solarzellen mit filigraner Metallisierung und Farbvarianten entwickelt, die eine ästhetische Einbindung von Solarmodulen in Fassaden und Dächer erlauben. Beispielsweise farbige MorphoColor®-Module: durch eine spezielle Glasbeschichtung lassen sie sich in allen Spektralfarben mit hoher Farbsättigung und Winkelstabilität herstellen, bei einem um nur 7 %<sub>rel</sub> verringerten Wirkungsgrad.

---

## **Agrophotovoltaik (APV)**

Bei der Agrophotovoltaik werden Solarmodule über Ackerflächen installiert, was den Ausbau der PV-Leistung bei gleichzeitiger Nutzung der Flächen für den Ackerbau ermöglicht. Im Rahmen eines Forschungsprojekts am Bodensee konnte das Fraunhofer ISE eine Steigerung der Landnutzungseffizienz zwischen 60 % und 84 % sowie eine Steigerung der Resilienz in der Landwirtschaft bei Trockenperioden nachweisen. Weiterer Zusatznutzen ergibt sich u. a. durch Schutz vor Hagel-, Dürre- und Frostschäden, die Reduktion des Bewässerungsbedarfs und die Nutzung des Solarstroms vor Ort.





### Fahrzeugintegrierte PV (Vehicle-Integrated Photovoltaics, VIPV)

Bei der VIPV ersetzen Solarmodule Teile der Fahrzeughülle und versorgen elektrische Verbraucher oder speisen in die Antriebsbatterie bei Elektrofahrzeugen ein, wodurch sie die Reichweite erhöhen. Die Ansprüche an die ästhetische Integration und die Moduleffizienz sind bei Fahrzeugen besonders hoch. Das Fraunhofer ISE hat ein sphärisch gewölbtes PKW-Solardach entwickelt, dessen hocheffiziente Solarzellen eine Leistung von etwa  $210 \text{ W/m}^2$  liefern. Durch die überlappende Verschaltung in Schindeltechnik lässt sich die Modulfläche maximal für die Stromerzeugung nutzen und bietet ein homogenes, ästhetisches Gesamtbild. Geringere Widerstandsverluste und der Wegfall der Verschattung durch Zellverbinder sowie eine besonders hohe Verschattungstoleranz sorgen für eine um bis zu  $2\%_{\text{abs}}$  höhere Moduleffizienz im Vergleich zu konventionellen Solarmodulen. Für Leichtbauanwendungen in Nutzfahrzeugen untersucht das Fraunhofer ISE auch glasfreie Aufbauten.

### Verkehrswegeintegrierte PV (Road Integrated PV, RIPV)

Verkehrswegeintegrierte Photovoltaik (RIPV) umfasst die Einbettung von Solarmodulen in, an und über Verkehrswegen. Das kann direkt in Straßen, Fußwegen und Plätzen sein, aber auch auf Gleisen oder den Verkehrswegen zugeordneten Flächen wie Lärmschutzwänden oder Seitenstreifen. Verkehrswege in Deutschland bedecken ca. 5 % der Landesfläche und bieten somit ein enormes technisches Potenzial, das auf bereits bebauter (horizontaler) Fläche erreicht werden kann.

Bei der Integration von Solarmodulen direkt in die Straße müssen diese ausreichend Haftung für alle Verkehrsteilnehmer auch unter schwierigen Wetterbedingungen bieten. Hierfür müssen besonders langlebige, strukturierte Moduloberflächen realisiert werden.

### Schwimmende PV (Floating PV, FPV)

Für schwimmende PV-Kraftwerke, deren Module auf Schwimmkörpern auf einem stehenden Gewässer oder auf dem Meer angebracht sind, ist weltweit ein sehr dynamisches Wachstum zu verzeichnen (über 1,1 GW an installierter Leistung Mitte 2018). Auch Deutschland hat mit gefluteten Tagebauflächen, Kiesgruben und teilweise Stauseen ein riesiges technisches Potenzial für diese Technologie. Die Vorteile von FPV liegen in der kostengünstigen Umsetzung in großem Maßstab, dem Anstieg der PV-Effizienz durch Kühleffekte des Gewässers und der Reduktion der Verdunstungsrate, wodurch der Wasserverlust reduziert werden kann.

### Urbane Photovoltaik (UPV)

Urbane Photovoltaik (UPV) nutzt versiegelte Flächen in Städten und Gemeinden, um regenerativen Strom zu erzeugen und die Orte visuell ansprechend zu gestalten. Beispiele sind große Parkplätze, öffentliche Plätze oder Sportanlagen auf denen Photovoltaik als Schattenspender, in Kombination mit Licht, mit Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität oder Regenschutz installiert wird. Hierdurch werden die Orte für den Nutzer aufgewertet und die Energiewende wird positiv erlebbar. Weitere Beispiele sind die Kombination von Photovoltaik, Beleuchtung, Schattenspender und Regenschutz an zentralen Busbahnhöfen oder auf Parkplätzen größerer Veranstaltungsgelände.



# PHOTOVOLTAIK

Als Game Changer des globalen Energiesystems sieht die Global Alliance of Solar Energy Research Institutes (GA-SERI), der das Fraunhofer ISE neben NREL (USA) und AIST (Japan) als Mitglied angehört, die Photovoltaik. [Ein Artikel dazu wurde im Mai 2019 im Journal »Science« veröffentlicht.](#) Zu dieser Wahrnehmung geführt haben dramatische Kostensenkungen und der rasante Ausbau der Produktionskapazitäten. Nicht nur der Stromsektor, sondern auch Verkehr, Wärme, Industrie und Chemieprozesse werden in Zukunft maßgeblich durch Solarstrom versorgt. Darin liegen Chancen, aber auch Herausforderungen – auf der Ebene des Energiesystems ebenso wie für Forschung und Industrie. Ende 2018 waren weltweit ca. 488 GW PV-Leistung installiert. Der dominierende Kostenanteil von PV-Kraftwerken, die Investitionskosten, fielen seit 2006 dank technologischen Fortschritts, Skalen- und Lerneffekten im Mittel um ca. 13 % pro Jahr, insgesamt um 75 %. In Deutschland können heute konkurrenzfähige Stromgestehungskosten von 4–5 Eurocent/kWh erreicht werden. Um die Energiewende erfolgreich umsetzen zu können und uns dem Ziel einer CO<sub>2</sub>-freien Energieversorgung zu nähern, benötigen wir einen PV-Ausbau, der nicht mehr nur auf Dächern und Freiflächen realisiert werden wird. Wir haben daher am Fraunhofer ISE das Thema »Integrierte Photovoltaik« gestartet (Seiten 18–19).

*Die Vorlaufforschung für die Solarzellenproduktion führt das Fraunhofer ISE am 2018 umfassend modernisierten PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center durch.*

Forschung und Entwicklung haben an der Erfolgsgeschichte der Photovoltaik einen ganz wesentlichen Anteil. Das Fraunhofer ISE trägt mit seinen hervorragenden FuE-Ergebnissen zur kontinuierlichen Verbesserung der Wirkungsgrade sowie beim Materialeinsatz bei. Zentrale





Stichworte sind die am Institut entwickelte Technologie zur Passivierung der Kontakte (Tunnel Oxide Passivated Contact – TOPCon) sowie die Entwicklung eines speziellen High Performance Siliciums, das die Grundlage für neue Rekordwirkungsgrade bildet. Die Wafer-Bearbeitung überführen wir vom bisherigen Standort Freiberg an das Center für Silizium-Photovoltaik (CSP) in Halle. Ein weiterer Themenschwerpunkt dort ist das an Bedeutung gewinnende Recycling. Die Vorlauforschung des Fraunhofer ISE wird in unserem PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center industriell umgesetzt.

Ein zukunftsweisender Ansatz sind Tandemsolarzellen, die es uns ermöglichen, das begrenzende Auger-Limit von 29,4 % bei Einfachsolarzellen aus Silicium zu überwinden. Bei der Entwicklung von Tandemkonzepten kommen uns die über vier Jahrzehnte erworbenen Kompetenzen im Bereich Siliciumsolarzellen sowie bei der Herstellung von Mehrsolarzellen zugute. 2019 konnten wir den Weltrekord für eine monolithisch hergestellte Mehrsolarzelle aus III-V-Halbleitern und

Silicium auf 34,1% verbessern. Für eine Tandemzelle Perowskit auf Silicium erzielten wir einen Wirkungsgrad von 24,5%.

In der Konzentratorstechnologie zeigen wir bei Mehrfachzellen Spitzenwirkungsgrade von bis zu 46,1 % und einen Rekordwirkungsgrad für ein Modul von 41,4 %. Auch unsere Arbeiten an organischen und Perowskitsolarzellen eröffnen interessante Perspektiven und Anwendungsmöglichkeiten.

Wir entwickeln zudem Verfahren zur präzisen Charakterisierung und Ertragsanalyse von Zellen und Modulen erfolgreich weiter. Unser akkreditiertes CalLab PV Modules verfügt über einen weltweit führenden Wert hinsichtlich der Messunsicherheit von nur 1,1 %.

Mit unserem Portfolio sind wir für die Zukunft gut aufgestellt und tragen dazu bei, Photovoltaik noch effizienter zu machen – in Bezug auf Energieertrag, auf Produktionsverfahren, Materialeinsatz sowie auf eine nachhaltige Prozesskette.

# SILICIUM-PHOTOVOLTAIK



**344**

Mitarbeitende



**54**

Zeitschriften- und  
Buchbeiträge



**86**

Vorträge und  
Konferenzbeiträge



**9**

Neu erteilte Patente



Regelmäßige Infos zu  
den Meilensteinen unserer  
Forschung bieten unsere  
Newsletter!

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 Silicium-basierten PV-Modulen. Gerade der Wirkungsgrad spielt für die weitere Kostensenkung der Stromgestehungskosten eine entscheidende Rolle und steht deshalb im Mittelpunkt unserer Forschungsaktivitäten.

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 und Wissenschaftlerinnen, Ingenieure und Ingenieurinnen sowie Techniker und Technikerinnen 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.

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 sind tiefgehende Charakterisierungen der zugrunde liegenden Materialien, Prozesse und Produkte und eine sorgfältige Qualitätssicherung über die gesamte Wertschöpfungskette für unsere Kunden und Kooperationspartner von großer Bedeutung. Als neuen Leuchtturm unserer Solarzellenforschung eröffnen wir 2020 das neue Gebäude für unser Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen.

## Meilensteine 2019

- » [Vorstellung von flächensparenden Schindelsolarzellen mit hohen Wirkungsgraden](#)
- » [Wirkungsgradrekorde für monolithische Dreifachsolarzellen auf Siliciumbasis](#)
- » [Vorstellung einer Studie zur Ansiedlung von PV-Produktion in Deutschland](#)
- » [Reduzierter Silberverbrauch durch neuartige Feinlinien-Siebdruckmetallisierung](#)

Bild: Blick in eine Siebdruckanlage.



[www.ise.fraunhofer.de/silicium-photovoltaik](http://www.ise.fraunhofer.de/silicium-photovoltaik)

## Ansprechpartner

### Silicium-Photovoltaik

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)

### Metallisierung und Strukturierung

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

### Herstellung und Analyse von hocheffizienten Si-Solarzellen

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

### Pilotherstellung von industrienahen Si-Solarzellen

Dr. Florian Clement | Telefon +49 761 4588-5050  
[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)


### Technologiebewertung


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

## Ausgewählte Projekte 2019

 **CUT-A PLUS** – Cutting-Edge-Charakterisierung und -Technologie für die deutsche PV-Industrie

 **DISC** – Double Side Contacted Cells with Innovative Carrier Selective Contacts

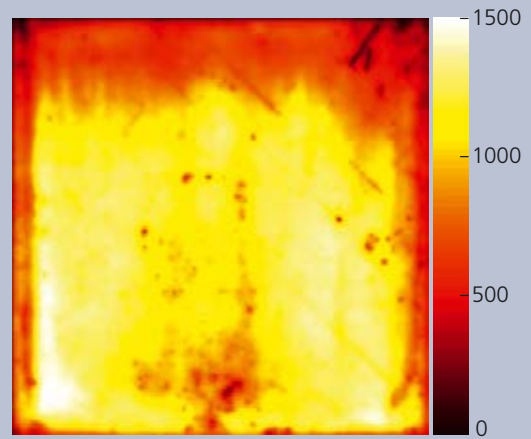
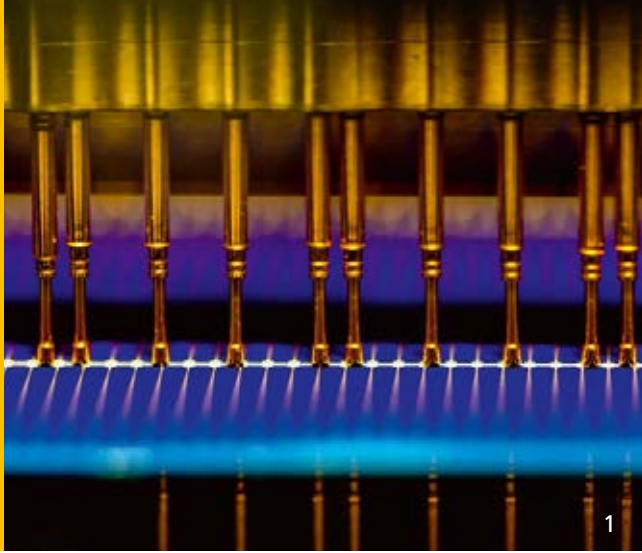
 **PV-BAT400** – PV-BASis Technologie für hocheffiziente Module mit 400 W Leistung und einer Leistungsdichte von 240 W/m<sup>2</sup>

 **EmitterPlus** – Integrierter Prozess für die Formierung von Gasphasenemittern und Selektiven Kontakten

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







## Inline-Test von Solarzellen: hochflexible Messplattform

Dr. Stefan Rein | Telefon +49 761 4588-5271 |  
sipv.metrology@ise.fraunhofer.de

Die höheren Wirkungsgrade neuartiger Solarzellen werden von einer größeren Anfälligkeit gegenüber Material- und Prozessschwankungen begleitet. Um diese Variationen besser zu kontrollieren und weiteres Potenzial für Prozessverbesserungen zu erkennen, sind entsprechende Inline-Charakterisierungsverfahren von entscheidender Bedeutung.

Das Fraunhofer ISE betreibt zur Entwicklung und Evaluation dieser Verfahren einen hochflexiblen Inline-Solarzellentester für unterschiedlichste Zellkonzepte in seinem PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center. Herzstück ist ein Messplatz, in dem die Leistungsdaten auch von bifazialen Solarzellen unter reiner Vorderseiten-, reiner Rückseiten- und beidseitiger Beleuchtung durch zwei unabhängige Xenon-Blitzröhren in Sekundenbruchteilen gemessen werden können. Dies erlaubt die Entwicklung und Anwendung neuer Sortieralgorithmen für optimierte bifaziale Erträge und klassentreue Module bei unterschiedlichen Beleuchtungsszenarien. Auch die automatisierte Charakterisierung von busbarlosen Solarzellen und Rückkontaktsolarzellen sowie Solarzellen im Voll-, Halb- und Schindelformat ist möglich. Eventuell auftretende Hysterese-Effekte kann das Messsystem korrigieren. Neben der Leistungsmessung sind u. a. Messsysteme für Elektro- und Photolumineszenz-Imaging, Thermographie, Spektrophotometrie und spektrale Empfindlichkeit integriert, die eine umfassende Verlust- und Potenzialanalyse ermöglichen. Wir können zudem weitere Systeme und Komponenten zu Evaluationszwecken temporär in den Automaten einfügen.

1 Elektrische Kontaktierung der Solarzellen während der Leistungsmessung mit Federstiften.

## Hochqualitatives Cast-Mono-Silicium mit SMART-Seeding-Technologie

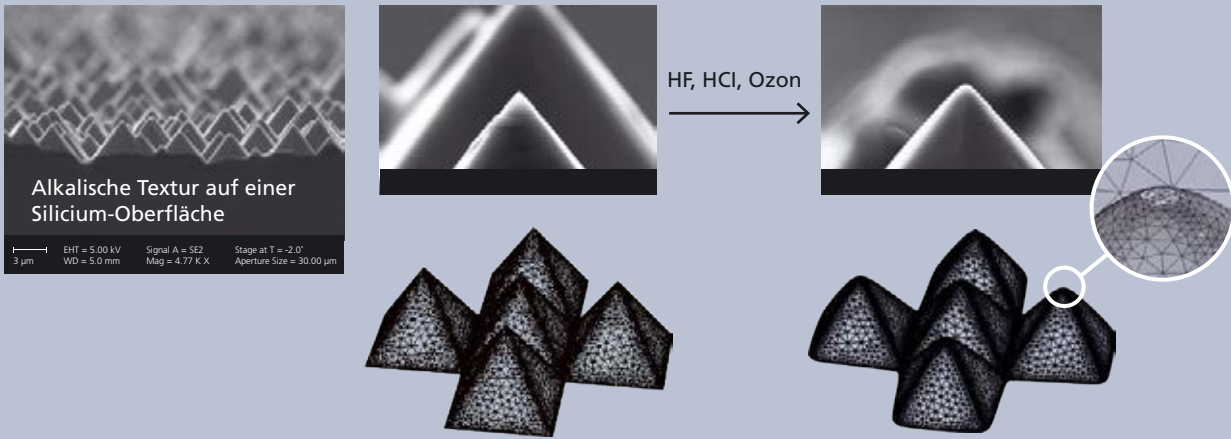
Dr. Stephan Riepe | Telefon +49 761 4588-5636 |  
sipv.material@ise.fraunhofer.de

Hocheffiziente Solarzellen mit PERC- oder TOPCon-Strukturen benötigen qualitativ hochwertige Siliciumwafer als Basismaterial. Das Fraunhofer ISE arbeitet, als Alternative zum etablierten Czochralski-Verfahren für das Ziehen von einkristallinen Ingots, an neuen Verfahren zur ressourcenschonenden Herstellung von einkristallinen Wafern nach dem Cast-Mono-Verfahren. Dabei werden spezielle Anordnungen monokristalliner Keimplatten am Boden eines Erstarrungstiegels genutzt, um aus der Schmelzphase einen überwiegend einkristallinen Block nach dem Prinzip der gerichteten Erstarrung zu züchten.

Durch die Kombination von großen Keimplatten mit dünnen Streifen aus Silicium nach dem Konzept der »Seed Manipulation for ARTificially controlled defect Technique« (SMART) haben wir Material mit gezielt eingebrachten funktionalen Defekten hergestellt, das deutlich weniger unerwünschte Kristallbaufehler und damit eine über den ganzen Wafer erhöhte Materialqualität aufweist. Die hergestellten Siliciumwafer zeigen in industrienahen Solarzellenprozessen ein vergleichbares Wirkungsgradpotenzial wie Cz-Silicium. So konnten auf p-Typ Wafern PERC-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 21,4 % und auf n-Typ Wafern TOPCon-Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 23,3 % hergestellt werden. Im Fokus der weiteren Arbeiten stehen die erfolgreiche Übertragung dieser Technik von der Labor- auf die aktuelle Industriegröße sowie die weitere Reduktion von Kosten und CO<sub>2</sub>-Emissionen für diesen Produktionsschritt.

2 Ladungsträgerlebensdauer (in  $\mu\text{s}$ ) eines  $10 \times 10 \text{ cm}^2$

SMART mono-Si-Wafer nach Hochtemperaturprozessierung.



1

## Der digitale Zwilling in der Produktion von Solarzellen

Dr. Martin Zimmer | Telefon +49 761 4588-5479 |  
sipv@ise.fraunhofer.de

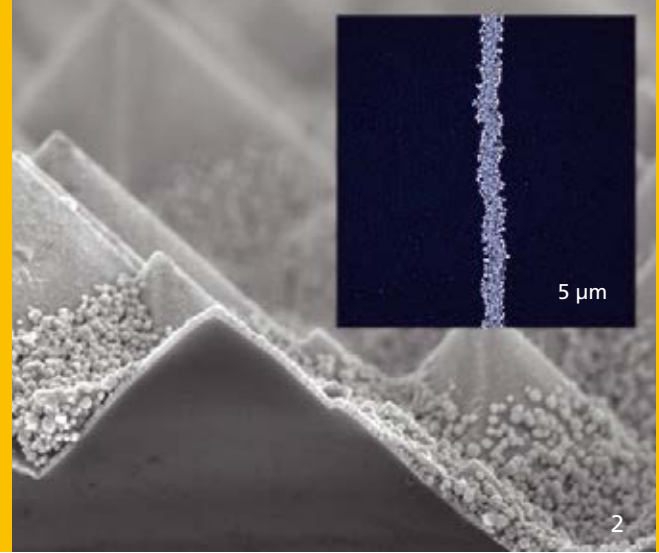
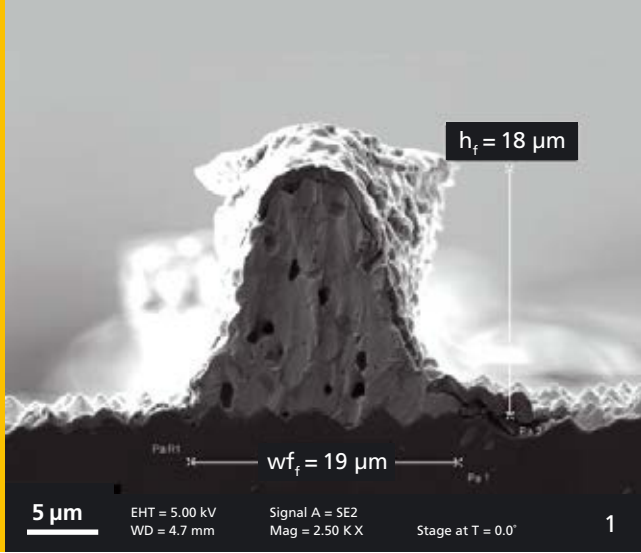
Die umfassende Digitalisierung von Produktions- und Geschäftsprozessen gilt als die nächste große, technologische Revolution, die künftig große Einsparungen entlang der gesamten Wertschöpfungskette verspricht. Um diese Potenziale der Digitalisierung nutzen zu können, muss sowohl von den Werkstücken als auch von den Produktionsmitteln ein möglichst vollständiges digitales Abbild vorliegen, das die Realität so umfassend wie möglich beschreibt. Dies wird als digitaler Zwilling bezeichnet.

Der digitale Zwilling einer Prozessanlage enthält zunächst die statischen Informationen über den Aufbau der Anlage, darüber hinaus sind aber auch alle Sensor- und Aktorwerte in Echtzeit verfügbar. Diese Sensorwerte können für die Analyse des Anlagenzustands genutzt werden. Damit können insbesondere Fehler in der Anlage frühzeitig erkannt und im Idealfall sogar vor ihrem tatsächlichen Eintreten vorhergesagt und behoben werden. Hierzu wurde am Fraunhofer ISE ein Konzept zur Fehlerdiagnose und zur Vorhersage von künftigen Fehlern entwickelt. Es basiert auf einer Inferenzmaschine, die die eingehenden Sensorwerte anhand von komplexen Regelwerken analysiert. Umfassendes Wissen von Anlagen- und Prozessingenieuren kann dort hinterlegt werden.

Neben der Anlage ist auch der Prozess selbst von großem Interesse. Ein hinreichend genaues Modell des Prozesses kann, unter Berücksichtigung des digitalen Zwillings des Eingangsmaterials, bereits vor Prozessdurchführung eine Aussage über das Ergebnis liefern. Diese Modelle können auf unterschiedlichen Abstraktionsgraden aufgebaut werden. Ab-initio-Modelle verwenden die zugrunde liegenden physikalischen Zusammenhänge und sind in der Lage das Prozessergebnis mit hoher Präzision vorherzusagen. Kalibrier- und Trainingsdatensätze sind hierfür nicht erforderlich. Mit Hilfe von Finite-Elemente-Berechnungen werden derzeit mikroskopische Ätzprozesse für die Oberflächen von Solarzellen charakterisiert.

Allerdings sind diese Modelle oft sehr rechenintensiv und können mit derzeit verfügbaren Computern nicht in Echtzeit bearbeitet werden. Deshalb werden die exakten Modelle oft durch Metamodelle approximiert. Für die schnelle Vorhersage von Prozessergebnissen haben wir am Fraunhofer ISE erfolgreich Methoden des Deep Learning für die automatisierte Bildverarbeitung eingesetzt. Hierzu wird ein speziell angepasstes Convolutional Neuronal Network (CNN) mit einer großen Datenmenge trainiert. Als Eingangsdaten werden Photolumineszenzbilder von multikristallinen Wafern herangezogen. Das Modell enthält nun alle nötigen Informationen über den gesamten Zellprozess und ist in der Lage, aus einem Photolumineszenzbild eines Wafers eine Vorhersage der elektrischen Kenndaten der zu produzierenden Zelle zu liefern.

1 *Simulationsmodell der pyramidenbedeckten Oberfläche; links: vor dem Reinigungsprozess, rechts: nach dem Reinigungsprozess; oben jeweils REM-Bilder aus dem Experiment, unten das entsprechende digitale Abbild.*



## Feinlinienmetallisierung reduziert Silberverbrauch

Dr. Florian Clement | Telefon +49 761 458-5050 | sipv.pilot@ise.fraunhofer.de

Die zentrale Herausforderung bei der Metallisierung von Siliciumsolarzellen ist, die teure Ressource Silber zu reduzieren und gleichzeitig den Wirkungsgrad zu erhöhen. In der Prozessentwicklung arbeiten wir deshalb daran, möglichst schmale Kontaktfinger mit einer für den Stromtransport ausreichenden Höhe zu realisieren sowie alternative Materialien zu evaluieren. Am Fraunhofer ISE werden verschiedene Metallisierungsverfahren für diese Anforderungen entwickelt und optimiert.

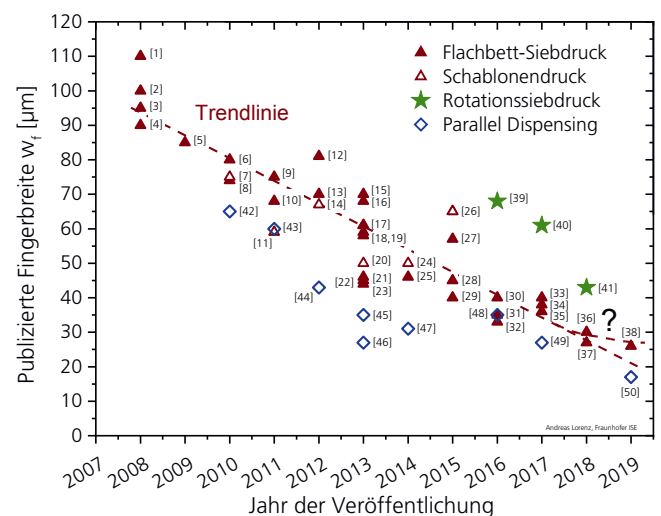
Der klassische Flachbettsiebdruck mit feinmaschigen Sieben sowie die am Fraunhofer ISE entwickelte Multi-Düsen-Dispensertechnologie, deren Kommerzialisierung über eine Ausgründung aus dem Fraunhofer ISE geplant ist, ermöglichen die Herstellung von Kontaktfingern mit Breiten und Höhen im Bereich 15–20 µm in einem Druckschritt. Der Silberverbrauch kann dadurch um bis zu 30 % gegenüber dem heutigen Industriestandard mit Kontaktfingerbreiten von 30–35 µm reduziert werden. Eine Steigerung des Wirkungsgrads um bis zu 1 %<sub>rel</sub> ist dabei möglich. Im Bereich Rotationsdrucktechnologie forschen wir derzeit an einer Erhöhung des Anlagendurchsatzes um den Faktor 2.

Mit dem am Fraunhofer ISE neu entwickelten »FlexTrail« Verfahren können Kontaktbreiten im Bereich von 10 µm erreicht werden. Die Kontakthöhe von wenigen µm ermöglicht die Integration in neuartige Modulkonzepte mit Drahtverschaltung, bei denen keine herkömmlichen Busbars mehr benötigt werden und zehn oder mehr Drähte zum Einsatz kommen. Der Silberverbrauch lässt sich dadurch um mindestens den Faktor 10 reduzieren.

- 1 Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme der Querschnittsfläche eines im Siebdruck realisierten Feinlinien-Kontaktfingers.
- 2 Rasterelektronenmikroskop- und Mikroskopaufnahme eines im »FlexTrail«-Verfahren realisierten Feinlinien-Kontaktfingers.

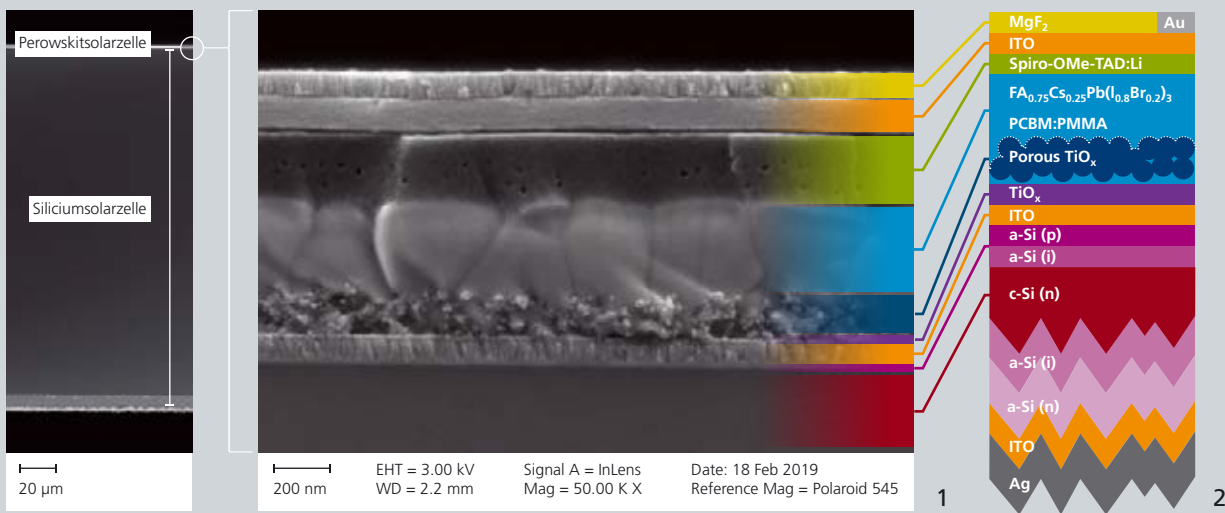
Ein alternativer Ansatz ist die Herstellung von sehr schmalen Kontakten mit Lasertransferverfahren. Die Kontaktbreiten liegen nach galvanischer Verstärkung mit Nickel und Kupfer im Bereich 20 µm. Der Vorteil dieses Ansatzes ist, dass eine Vielzahl unterschiedlicher Metalle eingesetzt und Silber komplett ersetzt werden kann.

Die Wirkungsgrade großflächiger Siliciumsolarzellen von über 22 % verdeutlichen das hohe Effizienzpotenzial der hier vorgestellten Metallisierungsverfahren. Zukünftige Forschungsarbeiten zielen darauf, dieses noch weiter zu steigern, den Silberverbrauch zu reduzieren und die Produktivität der Produktionsanlagen zu erhöhen. Die erworbenen Kompetenzen im Bereich Feinlinienmetallisierung sollen zukünftig auch vermehrt in anderen Geschäftsbereichen des Fraunhofer ISE zum Einsatz kommen, wie z. B. in der Produktionstechnologie für Brennstoffzellen.



Grafik: Entwicklung der gedruckten Kontaktfingerbreite der letzten zehn Jahre für verschiedene Druckverfahren.





## Im Tandem zu höchsten Wirkungsgraden bei niedrigen Kosten

Dr. Jan Christoph Goldschmidt | Telefon +49 765 4588-5475 | [emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de](mailto:emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de)

Der Wirkungsgrad von Siliciumsolarzellen ist fundamental auf 29,4 % begrenzt. Eine Grenze, die sich schnell nähert, mit Wirkungsgraden im Labormaßstab von über 26 % und einem Anstieg des Wirkungsgrads in der industriellen Produktion von 0,5 % pro Jahr. Silicium-basierte Tandemsolarzellen ermöglichen dagegen Wirkungsgrade von über 30 %. Hier nutzt eine zweite Solarzelle aus einem Halbleiter mit höherer Bandlücke effizient die Photonen mit hoher Energie. Die Photonen mit niedriger Energie werden von der Siliciumsolarzelle genutzt.

Besonders vielversprechend sind Perowskite in Kombination mit Silicium. Perovskitsolarzellen erzielen hohe Wirkungsgrade und sind kostengünstig herzustellen. In detaillierten Kostenrechnungen konnten wir zeigen, dass sich der Einsatz von Perovskit-Silicium-Tandemsolarzellen besonders für Aufdachanlagen lohnt. Hier sind die verfügbaren Flächen begrenzt und die Kosten zur Installation tendenziell höher. Der Nutzen von hohen Wirkungsgraden ist deshalb besonders hoch.

Mit hocheffizienten Hetero-Junction-Siliciumsolarzellen, der Entwicklung eines stabilen Perovskitabsorbers mit einer Bandlücke von 1,7 eV und dem Einsatz neuartiger Oberflächenpassivierungsschichten in der Perovskitsolarzelle konnten wir Perovskit-Silicium-Tandemsolarzellen mit einer Rekord-Leerlaufspannung von über 1,8 V herstellen. Entscheidend hierfür war auch die Entwicklung eines besonders schonenden Sputterprozesses für die Abscheidung von Indium Zinn Oxid (ITO) als leitfähige Kontaktschicht auf der Vorderseite.

Derzeit erreichen wir Wirkungsgrade von knapp 25 %. Durch verbesserte Passivierungsschichten, eine Verringerung der parasitären Absorption in den Kontaktschichten und der Abscheidung auf texturierten Substraten zur Verringerung der Reflexionsverluste wollen wir schnell Wirkungsgrade jenseits von 28 % erzielen.

Für die Vorbereitung einer industriellen Produktion von Perovskit-Silicium-Tandemsolarzellen untersuchen wir unterschiedliche skalierbare Abscheidetechnologien für die Perovskitabsorber. Dazu gehören das Aufdampfen und die Sprühbeschichtung und deren Kombination in Hybridprozessen, sowie Prozesstechnologien für die Abscheidung von Kontaktschichten wie das Sputtern von NiO<sub>x</sub> und Atomic Layer Deposition von SnO<sub>x</sub>. Außerdem erforschen wir den Einsatz der TOPCon-Technologie für die Siliciumsolarzelle und die Verbindung der Perovskit- und der Siliciumsolarzelle über eine Silicium-basierte Tunnelodiode.

Durch die höheren Wirkungsgrade der Perovskit-Silicium-Tandemsolarzellen sinkt auch der Ressourcenverbrauch im Vergleich zu rein Silicium-basierten Photovoltaiksystemen. Um die Ökobilanz noch weiter zu verbessern, entwickeln wir im Fraunhofer Leitprojekt »MaNiTU – Materialien für nachhaltige Tandemsolarzellen mit höchster Umwandlungseffizienz« zusammen mit fünf anderen Fraunhofer-Instituten neue Materialien und Solarzellenstrukturen. Schwerpunkte sind hier der Ersatz des noch in geringen Mengen im Absorber vorkommenden Bleis und die Steigerung des Wirkungsgrads.

- 1 *Elektronenmikroskop-Aufnahme einer Perovskit-Silicium-Tandemsolarzelle. Die Perovskitsolarzelle ist nur eine sehr dünne Schicht auf der Siliciumsolarzelle.*
- 2 *Struktur der Perovskit-Silicium-Solarzelle. Oberflächenpassivierung und optimierte Kontakt- und Absorberschichten ermöglichen Rekordspannungen.*

# III-V- UND KONZENTRATOR- PHOTOVOLTAIK



**46**

Mitarbeitende



**14**

Zeitschriften- und  
Buchbeiträge



**20**

Vorträge und  
Konferenzbeiträge



**2**

Neu erteilte Patente



Regelmäßige Infos zu  
den Meilensteinen unserer  
Forschung bieten unsere  
Newsletter!

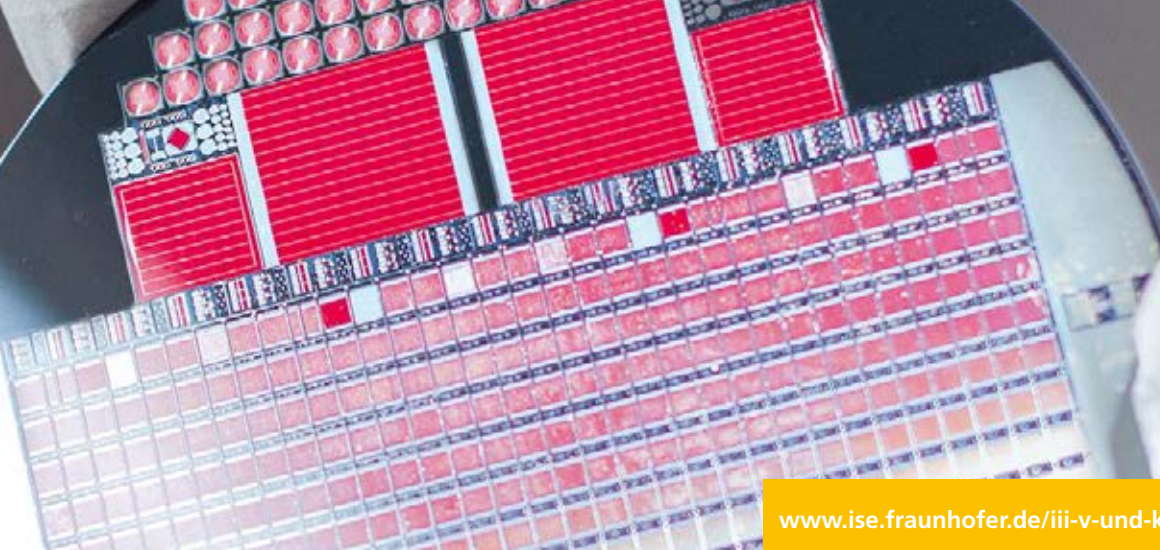
In diesem Geschäftsfeldthema bearbeitet das Fraunhofer ISE Anforderungen aus der Weltraum- und Konzentratorphotovoltaik. Weiterhin adressieren wir die effiziente Umwandlung von Licht aus anderen Quellen, wie Lasern, in elektrischen Strom. Wir arbeiten sowohl an Solarzellen der nächsten Generation mit optimierten Strukturen und Wirkungsgraden, als auch an der Anpassung dieser Bauelemente an die spezifischen Einsatzbedingungen unserer Kunden. So entwickeln wir z. B. ultradünne 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>, die bei sehr hohen Einstrahlungsdichten arbeiten. 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 der Wärmeenergie, die Entsalzung von Meerwasser oder die direkte Erzeugung von solarem Wasserstoff. Wir erreichen Innovationen durch systembezogenes Denken und setzen uns das Ziel, die besten Lösungen weltweit für unsere Kunden bereitzustellen. Hierbei können wir auf eine moderne industrierelevante Infrastruktur sowie auf die langjährige Expertise am Institut zurückgreifen.

## Meilensteine 2019

- » Wafer-gebundene III-V//Si-Tandemzelle erstmals mit Wirkungsgrad von 34,1 % (AM1.5g)
- » Direkt auf Silicium gewachsene GaInP/AlGaAs/Si-Dreifachsolarzelle mit 24,3 % (AM1.5g) Wirkungsgrad
- » Neue Vierfachzelle aus GaInP/GaAs/GaInAs//GaSb mit 43,8 % Wirkungsgrad bei 796-facher Konzentration
- » EyeCon Hybrid-Konzentratormodul mit 1088 cm<sup>2</sup> Fläche generiert 326 W/m<sup>2</sup> in Freiburg
- » Neues Mikro-CPV-Modul mit Spiegeloptik erreicht 29,7 % Modulwirkungsgrad mit hohem Akzeptanzwinkel von 0,6° und einer Bauhöhe < 25 mm
- » Projekt »HIPERION« (Hybrid Photovoltaics for Efficiency Record using Integrated Optical technology) erhält von der Europäischen Union einen Zuschuss von 10,6 Mio. Euro, um die industrielle Fertigung von Hocheffizienz-Solarmodulen in großem Maßstab zu entwickeln

*Bild: Wafer mit hocheffizienten III-V-Konzentratorsolarzellen, die im Kamerablitz rot aufleuchten – ein Zeichen hoher Materialqualität.*



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

### Ansprechpartner

#### III-V- und Konzentrator-Photovoltaik

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 2019


 **PoTaSi** – Demonstration des Potenzials von monolithischen Tandemsolarzellen aus III-V-Halbleitern und Silicium

 **ALFAMA** – Advanced Lightweight and Flexible Array with Mechanical Architecture

 **HeKMod4** – Hocheffizientes Konzentratormodul mit GaSb-basierter Vierfachsolarzelle

 **RadHard** – Ultra High Efficiency Radiation Hard Space Solar Cells on Large Area Substrates

 **CPVMod** – CPV-Modul im modularen Aufbau

 **KoReMo** – Kostenreduktion und Ressourceneffizienz durch neue Versorgungssysteme für metallorganische Ausgangsstoffe in der Epitaxie von III-V-Hochleistungssolarzellen

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten  
[www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-02](http://www.ise.fraunhofer.de/de/forschungsprojekte/1-02)





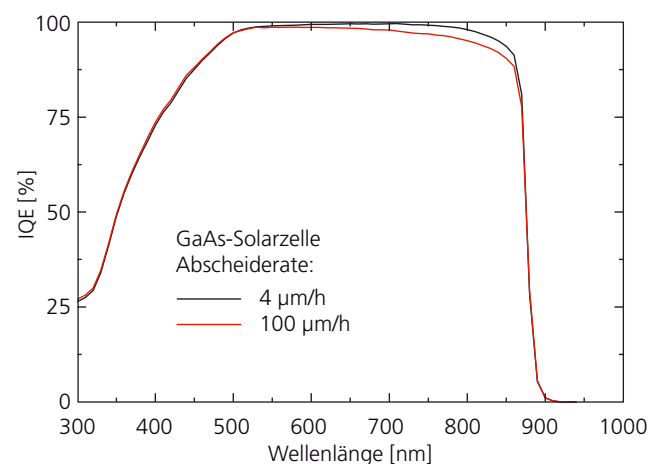
1

## Schnelles Wachstum von III-V-Halbleiterschichten für Solarzellen

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

Mehrfachsolarezellen aus III-V-Verbindungshalbleitern erreichen bei weitem die höchsten Umwandlungseffizienzen von Sonnenlicht in elektrischen Strom. Die Anwendung ist bisher allerdings auf Nischen wie die Stromversorgung von Satelliten begrenzt. Dies liegt besonders an den um den Faktor 100 höheren Material- und Herstellungskosten im Vergleich zu Siliciumsolarzellen. Wir arbeiten daher an Lösungen, um die Prozesse in Zukunft billiger zu machen. Ein Ansatz sind kostengünstige Substrate. So haben wir kürzlich erstmals eine GaInP/GaAs//Si-Dreifachsolarezelle mit einem Wirkungsgrad von 34 % hergestellt. Ein weiterer wichtiger Ansatz ist die Reduktion der Epitaxiekosten für die Abscheidung der III-V-Halbleiterschichten. Heutige Prozesse aus der Opto- und Mikroelektronik sind auf hohe Präzision und kleine Stückzahlen ausgelegt. In der Photovoltaik geht es hingegen um sehr große Flächen, und im Gegenzug kann die Anforderung an die Schichten an manchen Stellen relaxiert werden. In einem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt »MehrSi« haben wir untersucht, wie weit die Abscheiderate und die Abscheideeffizienz für GaAs-Schichten erhöht werden kann. Hier haben wir im letzten Jahr erstmals mittels metallorganischer Gasphasenepitaxie (MOVPE), der Standardmethode zur industriellen Herstellung von III-V-Solarzellen, eine Wachstumsrate von 280  $\mu\text{m}/\text{h}$  demonstriert. Dies entspricht einer Verdreifachung der bisher typischen Wachstumsrate. Gleichzeitig konnte die Effizienz des Ga-Einbaus um etwa 60 % erhöht und der Verbrauch von Gruppe-V Materialien um den Faktor 6 gesenkt werden. Bei einer Rate von 100  $\mu\text{m}/\text{h}$  wurde die Absorberschicht einer GaAs-Solarezelle in 2 min abgeschieden und ein Wirkungsgrad von 23,3 % gemessen im Vergleich zu 24,6 % für eine Referenzstruktur bei 4  $\mu\text{m}/\text{h}$ .

Die Wachstumsrate für die  $\text{Ga}_{0,5}\text{In}_{0,5}\text{P}$ -Oberzelle wird bisher vor allem durch den In-Präkursor limitiert. Das typisch verwendete Trimethylindium ist ein Feststoff mit niedrigem Dampfdruck, wodurch die In-Menge, die in den Prozess geleitet werden kann, begrenzt ist. Um dies zu überwinden, wurde im Projekt »KoReMo« eine neuartige flüssige Trimethylindium-Quelle mit einem Direkt-Verdampfersystem in eine bestehende Produktionsanlage integriert. Im Vergleich zur Feststoffquelle kann damit eine um den Faktor 20 größere In-Menge in den Reaktor geleitet werden. Eine erste, mit diesem neuen Verfahren hergestellte GaInP-Solarezelle erreichte bereits vergleichbare Solarzellenparameter, wie eine konventionell hergestellte Referenz.



Graphik: Interne Quanteneffizienz als Funktion der Wellenlänge einer GaAs-Solarezelle, die bei einer Wachstumsrate von 100  $\mu\text{m}/\text{h}$  abgeschieden wurde (rot) im Vergleich zu einer bei 4  $\mu\text{m}/\text{h}$  gewachsenen Referenz (schwarz).

1 Blick in einen MOVPE »Close Coupled Showerhead« Reaktor, mit dem Abscheideraten von über 280  $\mu\text{m}/\text{h}$  realisiert wurden.





## Evaluierung der Konzentratoren PV-Technologie in Indien

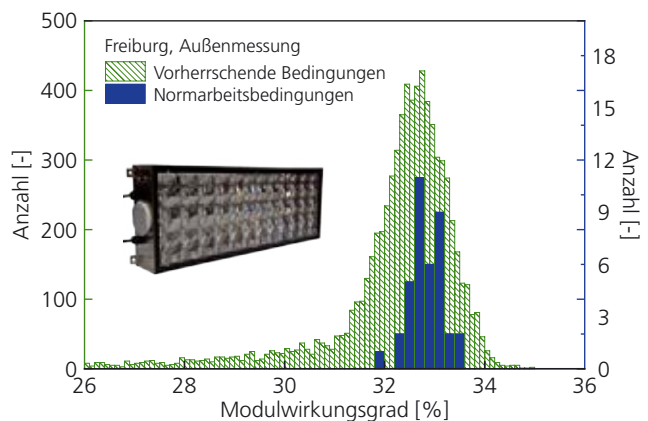
Dr. Gerald Siefer | Telefon +49 761 4588-5433 | cpv@callab.de

Bei der Konzentratoren-Photovoltaik (CPV) wird das Sonnenlicht in Gegenden mit hoher direkter Solareinstrahlung durch Linsen auf kleine, hocheffiziente Mehrfachsolarzellen fokussiert. CPV-Module erreichen so Wirkungsgrade von deutlich über 30 %. Es gibt gegenwärtig keine andere PV-Technologie mit ähnlich hohen Umwandlungseffizienzen. Allerdings müssen die Module präzise dem Sonnenstand nachgeführt werden. Die spezifischen Anforderungen und Herausforderungen, die sich beim Einsatz der CPV-Systeme in Indien ergeben, untersuchen wir gemeinsam mit NETRA, der Forschungseinrichtung des größten indischen Energieversorgers NTPC. Das deutsch-indische Projekt wird gefördert durch die Kreditanstalt für Wiederaufbau KfW aus Mitteln des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU).

Seit mehr als 20 Jahren führt das Fraunhofer ISE Messungen von CPV-Modulen durch. Wir haben dabei Messprozeduren entwickelt, mit denen wir die elektrische Normleistung der Module unter Konzentratoren-Standardtestbedingungen analog der IEC Norm 62670-3 bestimmen können. Hierzu werden mehrere tausend Einzelmessungen ausgewertet (siehe Grafik). Zudem unterstützen wir die Erstellung von Datensätzen für die Berechnung des Jahresenergieertrags, z.B. mit dem Programm »PVSystem«.

Der Fokus unserer Arbeiten in Indien liegt auf der Evaluierung von CPV-Systemen und Modulen sowie dem Wissenstransfer. Wir haben vor Ort Seminare durchgeführt, um das Verständnis für die CPV-Technologie in diesem Land mit einem wachsendem Bedarf an regenerativer Stromerzeugung zu steigern. Zudem wurde ein Außenteststand mit Nachführeinheit und Messelektronik auf dem Gelände des Forschungspartners NETRA in Greater Noida aufgebaut. Hier können CPV-Zellen und -Module unter den Einstrahlungs- und Wetterbedingungen in Indien mit hohen Temperaturen und hohem Aerosol-

gehalten in der Atmosphäre untersucht werden. Gleichzeitig werden meteorologische Umgebungsbedingungen wie Einstrahlung, Spektrum und Temperatur kontinuierlich aufgezeichnet. Wir vermessen ausgewählte CPV-Module und klassische Silicium-Flachmodule, um den Jahresenergieertrag beider Technologien direkt zu vergleichen. Neben dem Außenteststand wurden vier kommerzielle CPV-Systeme mit einer Leistung von 26 kW von den beiden Europäischen Firmen BSQ Solar (Spanien) und AZUR SPACE Solar Power (Deutschland) installiert. Die Systeme dienen als Referenz, um realistische Werte für den Jahresenergieertrag zu ermitteln.



Grafik: FLATCON® CPV-Modul gefertigt am Fraunhofer ISE mit einem Wirkungsgrad von 35 % bei Normtestbedingungen (25 °C Zelltemperatur und 1000 W/m<sup>2</sup>) und 33 % bei Normarbeitsbedingungen.

- 1 Kraftwerk aus vier CPV-Systemen mit einer kumulierten elektrischen Leistung von 26 kW. Dieses Kraftwerk wurde zu Forschungszwecken in Indien installiert.
- 2 Außentestlabor zur präzisen Bestimmung der elektrischen Leistung von CPV-Modulen unter Normbedingungen, installiert vom Fraunhofer ISE in Indien.

# NEUARTIGE PHOTOVOLTAIK-TECHNOLOGIEN



**37**

Mitarbeitende



**13**

Zeitschriften- und  
Buchbeiträge



**8**

Vorträge und  
Konferenzbeiträge



**3**

Neu erteilte Patente



Regelmäßige Infos zu  
den Meilensteinen unserer  
Forschung bieten unsere  
Newsletter!

Das Geschäftsfeld »Neuartige Photovoltaik-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 mit fortgeschrittenem Photonenmanagement zu erhöhen. Ein weiterer Ansatz sind alternative Prozesse und Materialien, wie organische, Farbstoff- und Perowskitsolarzellen, die ein deutliches Kostenreduktionspotenzial aufweisen.

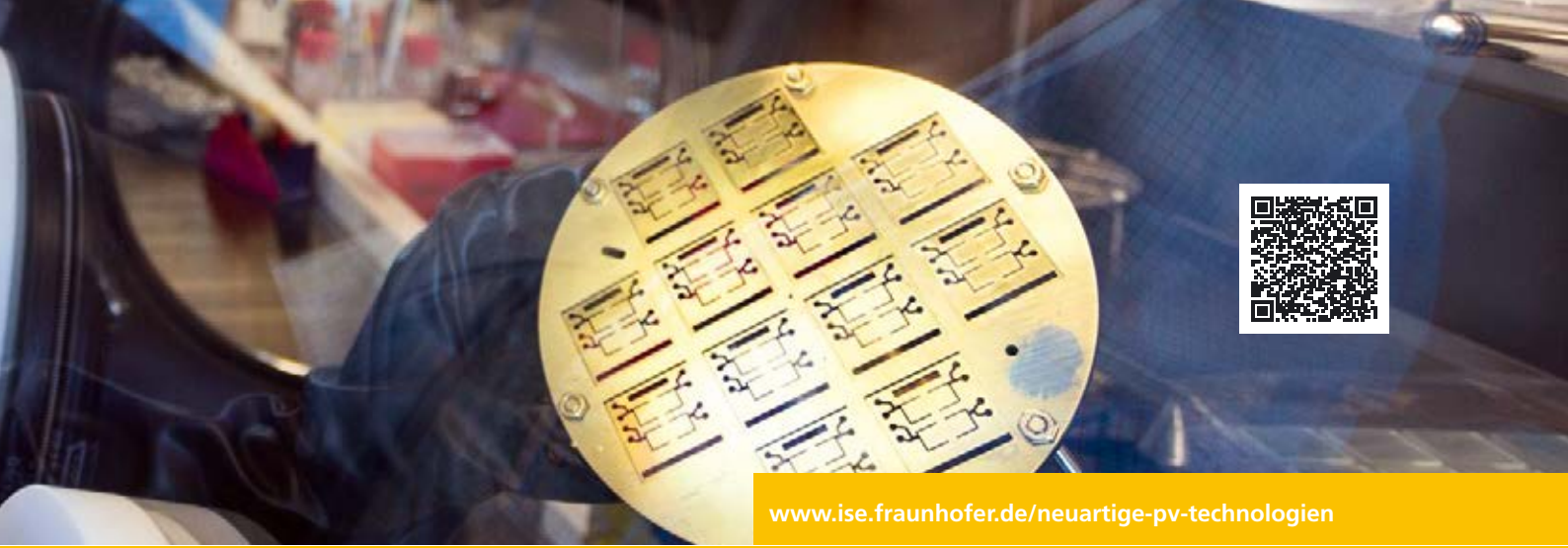
Unsere Arbeiten an organischen Solarzellen sind darauf ausgerichtet, flexible, kostengünstige und langzeitstabile organische Solarmodule zu realisieren. Hierfür entwickeln wir zusammen mit Industriepartnern stabile Beschichtungs- und Verkapselungsprozesse auf unserer Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsanlage, um diese anschließend auf große Anlagen zu übertragen. Für den Einsatz von organischen Solarzellen als Energieversorger von Sensoren bzw. Funk-Datenlogger in Innenräumen entwickeln wir Elektroden mit hoher Kurzschlussfestigkeit.

Im Arbeitsgebiet Perowskitsolarzellen arbeiten wir mit verschiedenen Ansätzen daran, neben einer hohen Effizienz 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 Tandem-Konzepten, d. h. Mehrfachsolarzellen aus einer Kombination von kristallinem Silicium mit III-V-Absorbermaterialien. Wir nutzen insbesondere unsere Konzepte zum Photonenmanagement, um eine gute Stromanpassung der Teilzellen zu gewährleisten.

## Meilensteine 2019

- » Erfolgreiche Rolle-zu-Rolle-Prozessierung von organischen Solarmodulen mit hoher technischer Ausbeute dank neuartigem, am Fraunhofer ISE entwickeltem Elektrodensystem
- » Organische Solarzelle mit 18 % Wirkungsgrad unter Schwachlichtbedingungen (Innenraumbeleuchtung mit 500 lux)
- » Start des Fraunhofer Leitprojekts »MaNiTU« – Materialien für nachhaltige Tandemsolarzellen mit höchster Umwandlungseffizienz – unter Koordination des Fraunhofer ISE

*Bild: Maske zum Aufdampfen  
von Metallkontakten auf  
Perowskitsolarzellen.*



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

---

## Ansprechpartner

### Neuartige Photovoltaik-Technologien

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

### Farbstoffsolarzellen

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

### Organische und Perovskitsolarzellen

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

---

## Ausgewählte Projekte 2019

 **H2OPV** – Organische Photovoltaik zur Abdeckung von Wasserreservoirien

 **ORGANAUT** – Organische Photovoltaik für autonome vernetzte Sensoren und Internet of Things (IoT)

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







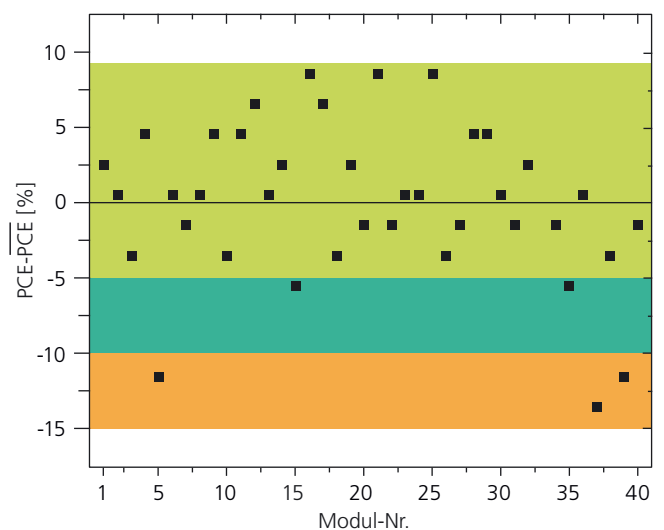
## Rolle-zu-Rolle-Prozess für ITO-freie organische Solarmodule

Dr. Birger Zimmermann | Telefon +49 761 203-4795 | [emergingpv.organic@ise.fraunhofer.de](mailto:emergingpv.organic@ise.fraunhofer.de)

Das Fraunhofer ISE hat organische Solarmodule erfolgreich in einem industrienahen Rolle-zu-Rolle-Beschichtungsprozess hergestellt. Dazu wurde eine Photovoltaik-Rückseitenfolie mit Aluminiumbarriere als Substrat verwendet, die bei einem Industriepartner mit einer am Fraunhofer ISE entwickelten Elektrode beschichtet wurde. Die Elektrode besteht aus einer Kombination von Metall- und Metalloxidschichten, die entwickelt wurde, um eine hohe Kurzschlussfestigkeit zu gewährleisten. Dies ist von entscheidender Bedeutung, da die einzelnen Schichten in organischen Solarzellen sehr dünn (im Bereich 100 Nanometer) und weich sind. Beschichtungsdefekte, die zuweilen durch Verunreinigungen auf dem Substrat oder durch Umlenkrollen entstehen, können sonst schnell zu lokalen Kurzschlüssen führen. Diese begrenzen dann wiederum den Wirkungsgrad der organischen Solarmodule oder können sogar einen völligen Ausfall verursachen.

Die neuartigen Elektroden auf flexiblen Barriersubstraten wurden von uns erstmals auf großer Fläche im Rolle-zu-Rolle-Verfahren eingesetzt. Die Substrate wurden dafür nacheinander mit dem organischen Absorber und dem Lochleiter PEDOT:PSS mit dem »slot-die-coating-Verfahren« beschichtet. Als letzte Schicht wurde eine Silber-Gitterelektrode im Rolle-zu-Rolle-Siebdruckverfahren aufgebracht. Für die Serienschaltung der einzelnen Zellstreifen haben wir ein patentiertes lösemittelbasiertes Strukturierungsverfahren eingesetzt. Anschließend wurden die Module vereinzelt (je 30 cm x 40 cm groß) und mit Epoxid-Kleber sowie einer Barrierefolie verkapselt. Insgesamt haben wir 39 Module ohne Vorauswahl vermessen.

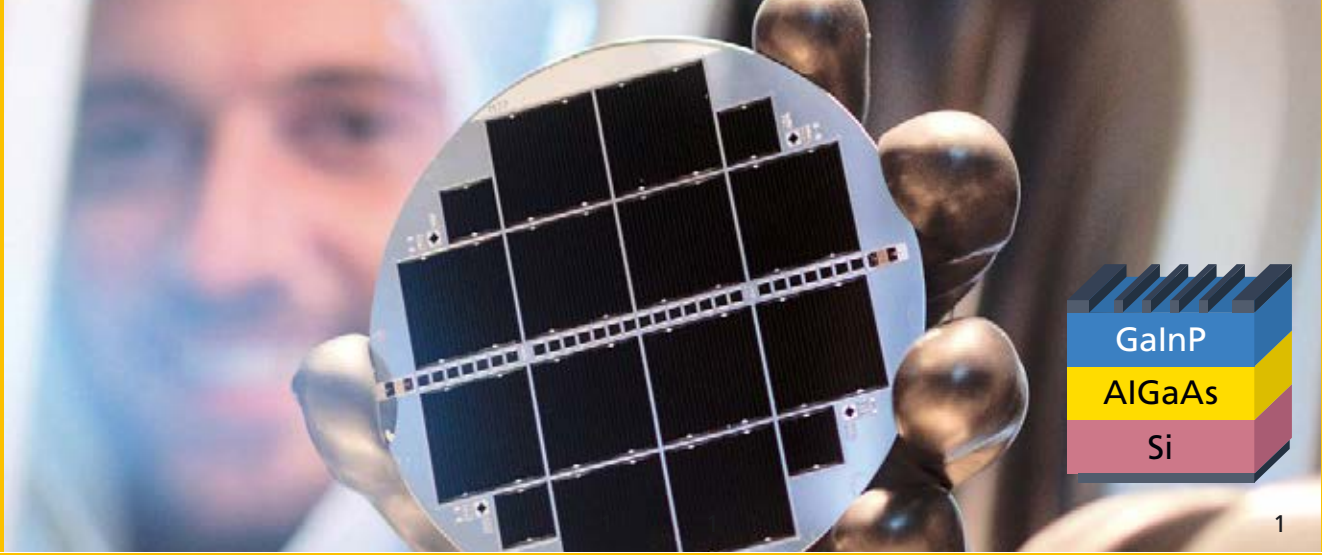
Das Ergebnis verdeutlicht, wie robust der Herstellungsprozess ist. Die Grafik zeigt, dass 87 % der Module besser als der Mittelwert -5% (hellgrün) sind. 92 % haben einen Wirkungsgrad besser als Mittelwert -10% (hellgrün und dunkelgrün) und lediglich drei der 39 Module liegen im Bereich Mittelwert -15 % (orange). Damit weichen sämtliche Modul-Wirkungsgrade maximal um 15 % vom Mittelwert ab. Dies lässt sich ganz wesentlich auf die eingesetzten Elektroden mit hoher Kurzschlussfestigkeit zurückführen. Damit ist der Gesamtprozess gegenüber Beschichtungsdefekten wesentlich weniger anfällig. Es läuft ein Verfahren zur Patentierung dieser neuartigen Elektroden.



Grafik: Abweichung des Wirkungsgrads vom Mittelwert als Ergebnis der Vermessung von 39 Modulen.

<sup>1</sup> Am Fraunhofer ISE entwickelte, Rolle-zu-Rolle-beschichtete organische Solarmodule, die unter realen Außenbedingungen kontinuierlich vermessen werden.





1

## III-V//Si-Dreifachsolarzelle erreicht 34 Prozent Wirkungsgrad

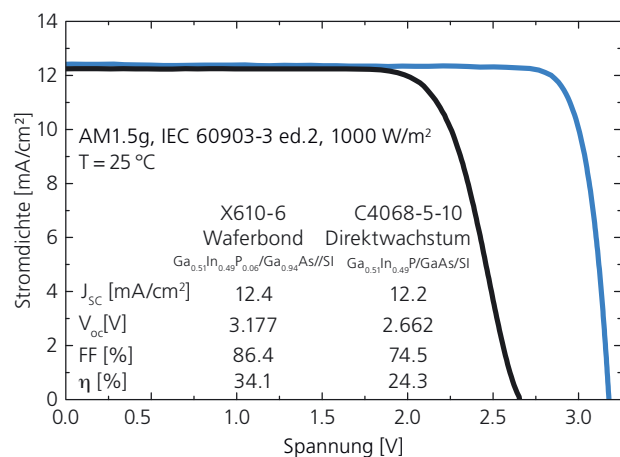
Dr. Frank Dimroth | Telefon +49 761 4588-5258 | [emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de](mailto:emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de)

Mehrfach- oder Tandemsolarzellen eröffnen die Möglichkeit, den Wirkungsgrad für die Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom im Vergleich zu heutigen Einfachsolarzellen deutlich zu erhöhen. Photonen transportieren je nach ihrer Wellenlänge unterschiedlich viel Energie. Silicium als bekanntester Halbleiter in der Photovoltaik absorbiert das Licht bis zu einer Wellenlänge von 1200 nm, wandelt all diese Photonen aber bei der gleichen Spannung von etwa 600 mV um. Das Grundprinzip einer III-V//Si-Mehrfachsolarzelle besteht darin, über das Silicium weitere Absorber zu stapeln, in diesem Fall aus III-V-Verbindungshalbleitern, die kurzwelliges Licht bei einer höheren Spannung umwandeln können. So steigt der Wirkungsgrad der Solarzelle theoretisch mit der Anzahl der Absorber immer weiter an. Praktisch haben wir Dreifachsolarzellen mit drei Teilzellen aus GaInP, AlGaAs und Silicium untersucht.

Die komplexe innere Schichtstruktur sieht man den Zellen von außen nicht an. Dies liegt unter anderem an der hohen Absorption der III-V-Halbleiter, die insgesamt nur eine Dicke von 2,5 µm ausmachen. Die Vorderseite der Zelle erscheint schwarz (siehe Foto), um möglichst viel Licht einzukoppeln und man erkennt das typische Metallgitter des Vorderseitenkontakts. Die Rückseite ist vollflächig mit Metall bedampft. Die Schwierigkeit bei der Herstellung solcher Mehrfachsolarzellen liegt darin, die ultradünnen III-V-Absorber mit sehr hoher Qualität herzustellen und mit der Siliciumsolarzelle zu verbinden. Ein Weg führt über das direkte epitaktische Wachstum der III-V-Schichten auf einer teilprozessierten Silicium-Unterzelle. In dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierten Projekt »MehrSi« erreichten wir mit diesem Verfahren einen Wirkungsgrad von 24,3 %. Dies ist ein weltweiter Spitzenwert für diese Technologie, aber es gibt schon heute Silicium-Einfachsolarzellen, die noch besser sind.

Die Herausforderung blieb somit, die Qualität der Schichten zu steigern. Dies ist uns über einen Trick gelungen, bei dem wir die III-V-Absorber zunächst auf GaAs epitaxieren und dann mittels Waferbonden auf Silicium übertragen. Mit einer solchen Dreifachsolarzelle konnten wir in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt »PoTaSi« einen Wirkungsgrad von 34,1 % nachweisen.

Die Ergebnisse zeigen, dass Mehrfachsolarzellen mit Wirkungsgraden von 30 % und mehr möglich sind. Die Herausforderung liegt allerdings darin, die Zellen zu wirtschaftlichen Kosten zu produzieren. Dies wird sicherlich noch einige Jahre der Forschung und Entwicklung in Anspruch nehmen.



Grafik: IV-Kennlinien von zwei III-V//Si-Mehrfachsolarzellen, eine direkt auf Silicium gewachsen, die andere auf Silicium gebondet.

1 Wafer mit zwölf III-V//Si-Mehrfachsolarzellen mit einer Fläche von jeweils 4 cm<sup>2</sup>. Die Zellen enthalten drei übereinander gestapelte Absorber aus GaInP, AlGaAs und Si, die unterschiedliche Spektralbereiche absorbieren.

# PHOTOVOLTAISCHE MODULE UND KRAFTWERKE



**132**

Mitarbeitende



**9**

Zeitschriften- und  
Buchbeiträge



**50**

Vorträge und  
Konferenzbeiträge



**3**

Neu erteilte Patente



Regelmäßige Infos zu  
den Meilensteinen unserer  
Forschung bieten unsere  
Newsletter!

Modultechnologie verwandelt Solarzellen in beständige Produkte für den sicheren Betrieb in PV-Kraftwerken und integrierten Anwendungen. Im Module-TEC – Module Technology Evaluation Center steht dem Fraunhofer ISE eine große Bandbreite moderner Prozess- und Analyseplattformen für die Verschaltung und Lamination von Solarzellen zur Verfügung. Die Materialerprobung, Produkt- und Prozessentwicklung erfolgt in engem Austausch mit unseren Kunden. Wir analysieren Zelle-zu-Modul-Bilanzen (CTM) über Messungen und Simulationen und bieten Lizenzen für das Berechnungstool »SmartCalc.CTM« an.

Die Zuverlässigkeit von Modulen prüfen wir in unserem akkreditierten TestLab PV Modules – für die Zertifizierung nach internationalen Normen und im Hinblick auf besondere Klimalasten und Degradationsrisiken. An Modulen aus Klimakammern und aus dem Feld analysieren wir Alterungsprozesse und Schadensfälle. Höchste Präzision bietet auch unser akkreditiertes Kalibrierlabor CalLab PV Modules, das mit einer Messunsicherheit von nur 1,1 % bei kristallinen Modulen weltweit führend ist.

Für PV-Kraftwerke bieten wir umfassende Qualitätssicherung in allen Projektphasen bis zum laufenden Betrieb. 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 und liefern Echtzeitstrahlungsdaten für PV-Strom-Hochrechnungen sowie für das Monitoring.

Zudem bieten wir Lösungen zur Integration von Photovoltaik in Hüllen, auf landwirtschaftlichen Nutzflächen und auf Wasserflächen. Unser Team entwickelt maßgeschneiderte, ästhetisch ansprechende Solarmodule für aktive Dächer, Fassaden, Fahrzeughüllen, Lärmschutzwände und Verkehrswege.

---

## Meilensteine 2019

- » Industrielle Fertigung von solaren Bauteilen und ihre Integration in Bauplanungsprozesse
- » Projektabschluss »PV-Live« mit TransnetBW
- » Agrophotovoltaik – Ressourceneffiziente Landnutzung
- » Autodach mit hocheffizienten Solarzellen und MorphoColor®-Farbschicht
- » Leistungsprognose für PV-Großkraftwerke

*Bild: Stringer im Module-TEC –  
Module Technology Evaluation  
Center des Fraunhofer ISE.*



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

## Ansprechpartner

### Photovoltaische Module und Kraftwerke

Dr. Harry Wirth | Telefon +49 761 4588-5858  
[pvmmod@ise.fraunhofer.de](mailto:pvmmod@ise.fraunhofer.de)

### Modultechnologie

Dr. Holger Neuhaus | Telefon +49 761 4588-5825  
[pvmmod.tech@ise.fraunhofer.de](mailto:pvmmod.tech@ise.fraunhofer.de)

### Modulkalibrierung

Dipl.-Ing. (FH) Frank Neuberger | Telefon +49 761 4588-5280  
[pvmmod.callab@ise.fraunhofer.de](mailto:pvmmod.callab@ise.fraunhofer.de)

### Gebrauchsdauer und Schadensanalyse

Dipl.-Ing. (FH) Daniel Philipp | Telefon +49 761 4588-5414  
[pvmmod.testlab@ise.fraunhofer.de](mailto:pvmmod.testlab@ise.fraunhofer.de)

### Photovoltaische Kraftwerke

Dipl.-Ing. (BA) Boris Farnung | Telefon +49 761 4588-5471  
[pvmmod.powerplant@ise.fraunhofer.de](mailto:pvmmod.powerplant@ise.fraunhofer.de)

### Integrierte Photovoltaik

Dr. Harry Wirth | Telefon +49 761 4588-5858  
[integrated-pv@ise.fraunhofer.de](mailto:integrated-pv@ise.fraunhofer.de)

### Solare Einstrahlungs- und Leistungsprognosen

Dr. Elke Lorenz | Telefon +49 761 4588-5015  
[pvmmod.forecast@ise.fraunhofer.de](mailto:pvmmod.forecast@ise.fraunhofer.de)

## Ausgewählte Projekte 2019

-  [WATERMED4.0](#) – Intelligente Technologien zur Verbesserung der Qualität und Sicherheit der Landwirtschaft im Mittelmeerraum
-  [PV2Go](#) – Solarpotenziale deutscher Verkehrswege – Modellierung, Messung und Validierung mit Citizen Scientists
-  [SHRIMPS](#) – Solar-Aquakultur-Habitats als Ressourcen-effiziente und Integrierte Multilayer-Produktionssysteme
-  [KleVer](#) – Kostensparende Klebstoff-basierte Verbindungstechnologie für Hocheffizienz-Solarzellen
-  [Lade-PV](#) – Entwicklung von fahrzeugintegrierter Photovoltaik für das On-Board-Laden von Elektro-Nutzfahrzeugen
-  [CONNECT](#) – Kombinierte Metallisierungs- und Verbindungstechnologie für effiziente PV-Module

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







## SmartCalc.CTM: Moduloptimierung mit digitalen Zwillingen

Max Mittag | Telefon +49 761 4588-5927 | [ctm@ise.fraunhofer.de](mailto:ctm@ise.fraunhofer.de) | [www.cell-to-module.com](http://www.cell-to-module.com)

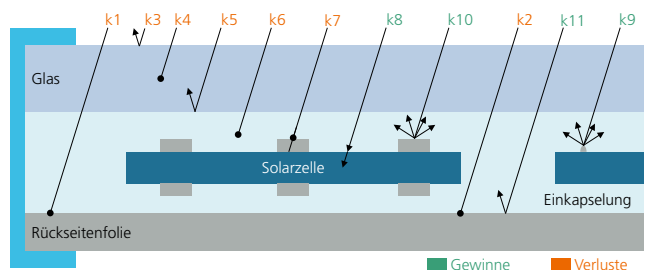
Die Analyse von Verlusten in technischen Systemen und die nachfolgende Optimierung sind zwar Teil jedes Entwicklungsprozesses, aber mit erheblichem Aufwand für Charakterisierung, Prototypenbau und der detaillierten Erfassung von Wirkmechanismen verbunden. Simulation und Digitalisierung ermöglichen es, Entwicklungszeiten und Ressourcen erheblich zu reduzieren und schnell und einfach Verbesserungsmöglichkeiten zu identifizieren.

Mit »SmartCalc.CTM« hat das Fraunhofer ISE eine Software entwickelt, die PV-Module virtuell nachbildet und eine Analyse von Leistungs- und Effizienzverlusten von der Solarzelle bis zum fertigen Modul ermöglicht. Die zugrunde liegenden detaillierten, physikalischen Modelle für optisches, elektrisches und thermisches Modulverhalten erlauben eine präzise Vorhersage der Modulleistung. Ausgehend von Materialdaten, einer Beschreibung des Modulaufbaus und der Betriebsbedingungen analysiert die Software das Modulverhalten und gibt eine Übersicht über Verluste und Gewinne im PV-Modul.

Die digitale Nachbildung von Modulen durch physikalisch-technische Modelle ermöglicht es, in kurzer Zeit verschiedene Modulkonzepte zu vergleichen, einzelne technische Parameter zu variieren sowie »Was-wäre-wenn-Analysen« oder multidimensionale Optimierungen durchzuführen. Die benutzerfreundliche Oberfläche der Software erleichtert die Eingabe der Kenngrößen. Durch die flexiblen Modelle können die Entwicklungsabteilungen der Material-, Modul- und Anlagenhersteller PV-Moduldesigns vergleichen, für die es noch kein Produktionsequipment gibt, für die die Herstellung von Prototypen unwirtschaftlich wäre oder die als Vergleichsmaßstab herangezogen werden sollen.

SmartCalc.CTM ermöglicht die Analyse einer Vielzahl von Technologien und Varianten:

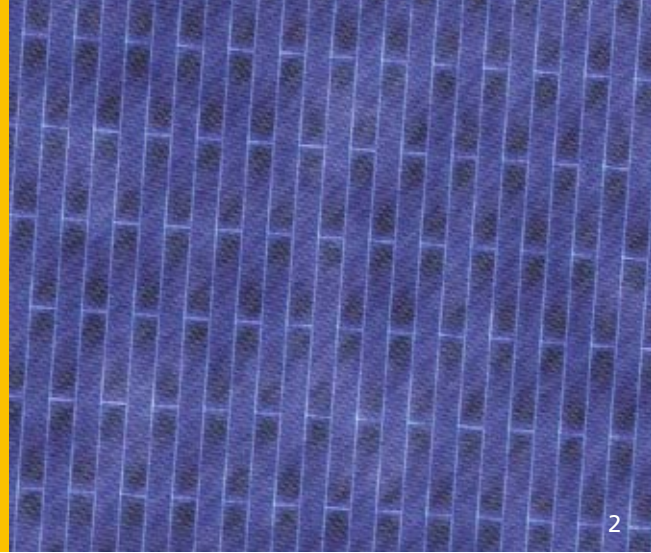
- » Mono- und bifaziale Solarzellen unterschiedlicher Zellgröße
- » Schindelverbindung, Rückkontakttechnologien (MWT, IBC)
- » Halb- und Vollzellen
- » Glas-Rückseitenfolie, Glas-Glas oder andere Schichtaufbauten und Materialien
- » Flachdraht- und Runddraht-Verschaltung für Löt- oder Klebeverbindungen



Grafik: Optische Gewinne und Verluste im PV-Modul.

Die in SmartCalc.CTM integrierten Modelle werden kontinuierlich erweitert und ermöglichen jetzt auch die Analyse von Modulen unter relevanten Betriebsbedingungen. Es können z. B. Einstrahlung, Umgebungstemperatur und Windgeschwindigkeit variiert werden. Die Modelle berechnen daraus die Modulleistung unter Berücksichtigung des Modulaufbaus und ermöglichen so eine weitergehende Analyse und Optimierung von der Solarzelle bis zum Betrieb des Moduls (»cell-to-system«). Eine kostenlose Demoversion steht auf unserer [Homepage zum Download](#) bereit.





## PV for Mobility: Solarstrom vom Autodach

Dr. Martin Heinrich | Telefon +49 761 4588-5024 | [pvmob.mobility@ise.fraunhofer.de](mailto:pvmob.mobility@ise.fraunhofer.de)

Nach aktuellen Schätzungen werden in Deutschland ab 2028 über 70 % aller neu zugelassenen Fahrzeuge elektrisch angetrieben, ein Teil davon als Hybrid-Fahrzeuge. Integrierte Solarzellen im Fahrzeug können den Strombedarf und die CO<sub>2</sub>-Emission deutlich reduzieren und die Reichweite von Elektrofahrzeugen spürbar erhöhen.

Der am Fraunhofer ISE entwickelte Prototyp eines hocheffizienten PKW-Solardachs ist mit seiner gewölbten Form und der farbigen Oberfläche ein komplett neuartiger Ansatz. Zum Einsatz kommen kommerzielle PERC-Solarzellen, die heute in der Fertigung Wirkungsgrade von über 22 % erreichen und kostengünstig am Markt verfügbar sind. Die Solarzellen werden mit einem schädigungsarmen Laserverfahren in sechs Streifen geschnitten. Die Streifen werden in Reihen gelegt, die wiederum versetzt mit einer kleinen Überlappung gegenüber der folgenden Reihe mit leitfähigem Kleber (ECA) verbunden werden. Auf diese Weise entsteht ein elektrischer und mechanischer Verbund, mit dem unterschiedliche Modulgrößen sehr flexibel vollständig belegt werden können. Dieses als Matrix-Schindeln bezeichnete Verfahren erlaubt es, die inaktive Fläche und die Widerstandsverluste in einem Modul gegenüber klassischen Verbindungsverfahren erheblich zu reduzieren.

Matrix-Schindel-Module haben eine sehr hohe Moduleffizienz, sie zeichnen sich durch ein äußerst homogenes Erscheinungsbild aus, sie zeigen geringere Leistungsverluste bei Teilverschattung und die Verbindung ist bleifrei. Am Fraunhofer ISE werden zusammen mit Material- und Anlagenherstellern Kleber, Prozesse und Anlagen für die Schindel- und Matrix-Schindeltechnologie entwickelt.

Zur Demonstration wurde ein Zellverbund auf der Basis der Matrix-Schindel-Technologie in ein handelsübliches, gewölbtes Panorama-Autoglasdach integriert. Dabei werden bereits etablierte Fertigungsprozesse für Fahrzeugdächer genutzt. Die am Fraunhofer ISE entwickelte optische Struktur MorphoColor<sup>®</sup> verdeckt die im Glasverbund liegenden Solarzellen und kann in beliebigen Farben mit hoher Farbsättigung produziert werden. Verglichen mit einem unbeschichteten Glas beträgt der Transmissionsverlust durch MorphoColor<sup>®</sup> durchschnittlich nur 7 %<sub>rel.</sub> Die Kombination von handelsüblichen PERC-Solarzellen, Matrix-Schindeln und MorphoColor<sup>®</sup>-Beschichtung ist die ideale Grundlage für kostengünstige, ästhetisch ansprechende Produkte für die Integrierte Photovoltaik.

Die Leistungsdichte des Photovoltaik-Autodachs kann ca. 210 W/m<sup>2</sup> erreichen und Strom für täglich bis zu 13 km Fahrstrecke auf der typischen Dachfläche eines Mittelklassefahrzeuges liefern. Die Abschätzung basiert auf der Sonneneinstrahlung an einem sonnigen Sommertag in Freiburg und einem Fahrzeugverbrauch von 17 kWh auf 100 km.

- 1 *Unsichtbare, hocheffiziente Matrix-Schindel-Solarzellen in einem Autodach.*
- 2 *Geschindelte Solarzellen in Matrixstruktur erzielen eine sehr hohe Effizienz.*



## Agrophotovoltaik steigert Landnutzungseffizienz deutlich

Maximilian Trommsdorff | Telefon +49 761 4588-2249 | pvmod.apv@ise.fraunhofer.de

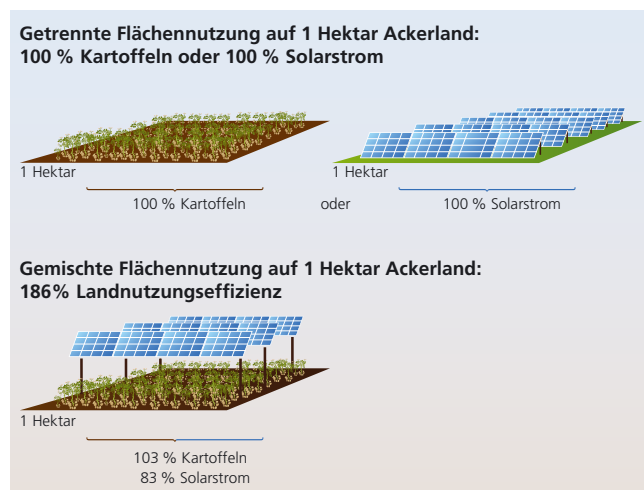
Die Umsetzung der Idee des Fraunhofer ISE-Institutsgründers Prof. Dr. Adolf Goetzberger hat lange auf sich warten lassen: Knapp vierzig Jahre nach seiner Veröffentlichung zur Agrophotovoltaik (APV), der Kombination von Solarstromproduktion und Landwirtschaft auf der gleichen Fläche, ist dazu weltweit ein klarer Trend zu erkennen. Staatliche Förderprogramme in Japan, China, Frankreich, den USA und zuletzt Südkorea zeigen, dass APV nicht nur technisch und wirtschaftlich machbar ist, sondern auch erheblichen Zusatznutzen für die Landwirtschaft generieren kann.

Seit 2014 wird die APV-Technologie vom Fraunhofer ISE im Rahmen von Förderprogrammen des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) untersucht und das Potenzial für Deutschland abgeschätzt. Bei einer Versuchsanlage am Bodensee konnte eine Steigerung der Landnutzungseffizienz um bis zu 86 % sowie eine Steigerung der Resilienz in der Landwirtschaft bei Trockenperioden nachgewiesen werden. Die Ergebnisse zeigen auch das enorme Potenzial der APV für aride Klimazonen, wo Kulturpflanzen und Nutztiere von der Verschattung durch die PV-Module profitieren können. Der spezifische Ertrag der PV-Anlage in 2018 lag mit 1285,3 kWh pro installiertem kW<sub>p</sub> auf einem überdurchschnittlichen Niveau. Berechnet man die Stromgestehungskosten, ist der Strom aus einer APV-Anlage bereits heute wettbewerbsfähig mit kleinen PV-Dachanlagen. Zudem ist mit sinkenden Kosten aufgrund von Lern- und Skaleneffekten zu rechnen.

Durch PV-Überdachung ist vor allem für Obst- und Sonderkulturen, die von zunehmenden Hagel-, Frost- und Dürreschäden besonders betroffen sind, weiterer Zusatznutzen zu erwarten. Synergiepotenziale zwischen der PV- und der Landwirtschafts-

ebene bestehen u. a. durch die Reduktion des Bewässerungsbedarfs und der Winderosion, durch die Optimierung der Lichtverfügbarkeit für Ackerfrüchte, u. a. im Fall nachgeführter PV-Systeme, durch die Nutzung der PV-Unterkonstruktion für Schutznetze oder -folien sowie durch Möglichkeiten der Regenwassersammlung für Bewässerungszwecke.

Die zunehmende Flächenknappheit, der wachsende Bedarf an erneuerbaren Energien, sinkende Modul- und Systemkosten, sowie die Notwendigkeit, die Resilienz in der Landwirtschaft zu erhöhen, lassen erwarten, dass Landwirtschaft und PV auch hierzulande zukünftig zusammen gedacht werden.



*Grafik: Durch die kombinierte Flächennutzung betrug 2018 die Landnutzungseffizienz der APV-Anlage mit Kartoffelanbau 186 %.*

1 Agrophotovoltaik-Anlage in Heggelbach am Bodensee.





## Performance-Analyse von kommerziellen PV-Kraftwerken

Dr. Björn Müller | Telefon +49 761 4588-5707 | [pvmmod.powerplant@ise.fraunhofer.de](mailto:pvmmod.powerplant@ise.fraunhofer.de)

Basierend auf den Daten von 44 PV-Kraftwerken in Deutschland mit einer Nennleistung zwischen 500 kW<sub>p</sub> und 1500 kW<sub>p</sub> und einer Betriebsdauer von etwa zehn Jahren hat das Fraunhofer ISE eine umfassende Performance-Analyse durchgeführt. Bei allen untersuchten Anlagen wurde eine umfangreiche Qualitätssicherung umgesetzt. Dabei haben wir gemeinsam mit unserem Partner Pohlen Solar Qualitätskriterien für die Auswahl von Solarmodulen festgelegt und verschiedene Modultypen in unseren Labors getestet. Ergänzend dazu haben wir für alle in den Anlagen verbauten Modultypen kalibrierte Leistungsmessungen von einer ausgewählten Stichprobe vorliegen. Auf Basis der durchgehenden Daten und der präzisen Messung der solaren Einstrahlung mit regelmäßig kalibrierten Strahlungssensoren können fundierte Aussagen zur Degradation getroffen werden.

Die wichtigste Schlussfolgerung unserer Arbeit ist, dass fast alle beobachteten Degradationseffekte reparierbar oder reversibel sind. Das gilt z. B. für Wechselrichterausfälle oder Verschmutzungen der PV-Module. Zudem wurde deutlich, dass neben den klimatischen und standortspezifischen Bedingungen die Betriebsführung und die Wartung einen signifikanten Einfluss auf die beobachteten Ertragsverluste haben. Wechselrichterausfälle waren die Hauptursache für die teilweise großen Schwankungen bei der Performance Ratio der Anlagen.

PV-Module, die nach zehn Jahren Betrieb aus dem Feld genommen wurden, zeigen sehr kleine Leistungsabweichungen im Vergleich zu den Ausgangswerten. Qualitativ hochwertige PV-Module sind sehr zuverlässig und stabil. Seit der Inbetriebnahme der ersten Kraftwerke im Jahr 2007 mussten weniger als 0,25 % der insgesamt 200 000 Module aufgrund von Defekten ausgetauscht werden.

An fast allen Standorten ist eine leichte Verschmutzung der Solarmodule zu erkennen. In einigen Projekten sind auch stark – meist durch Vogelkot – verschmutzte PV-Module vorhanden. Besonders in den letzten Jahren gab es in Deutschland längere Perioden mit wenig Niederschlag, sodass zukünftig auch über neue Reinigungsstrategien nachgedacht werden muss.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine fokussierte Qualitätssicherung die technischen Risiken deutlich reduzieren kann und den Betrieb von kommerziellen PV-Kraftwerken mit sehr hoher Performance Ratio garantiert. Zukünftig werden digitalisierte Prozesse Systemausfälle früher erkennen und neue Ansätze bei den Wartungskonzepten den Aufwand für den laufenden Betrieb der Anlagen deutlich optimieren.

<sup>1</sup> Das PV-Kraftwerk am Standort Altenstadt in Bayern ist seit 2006 in Betrieb.



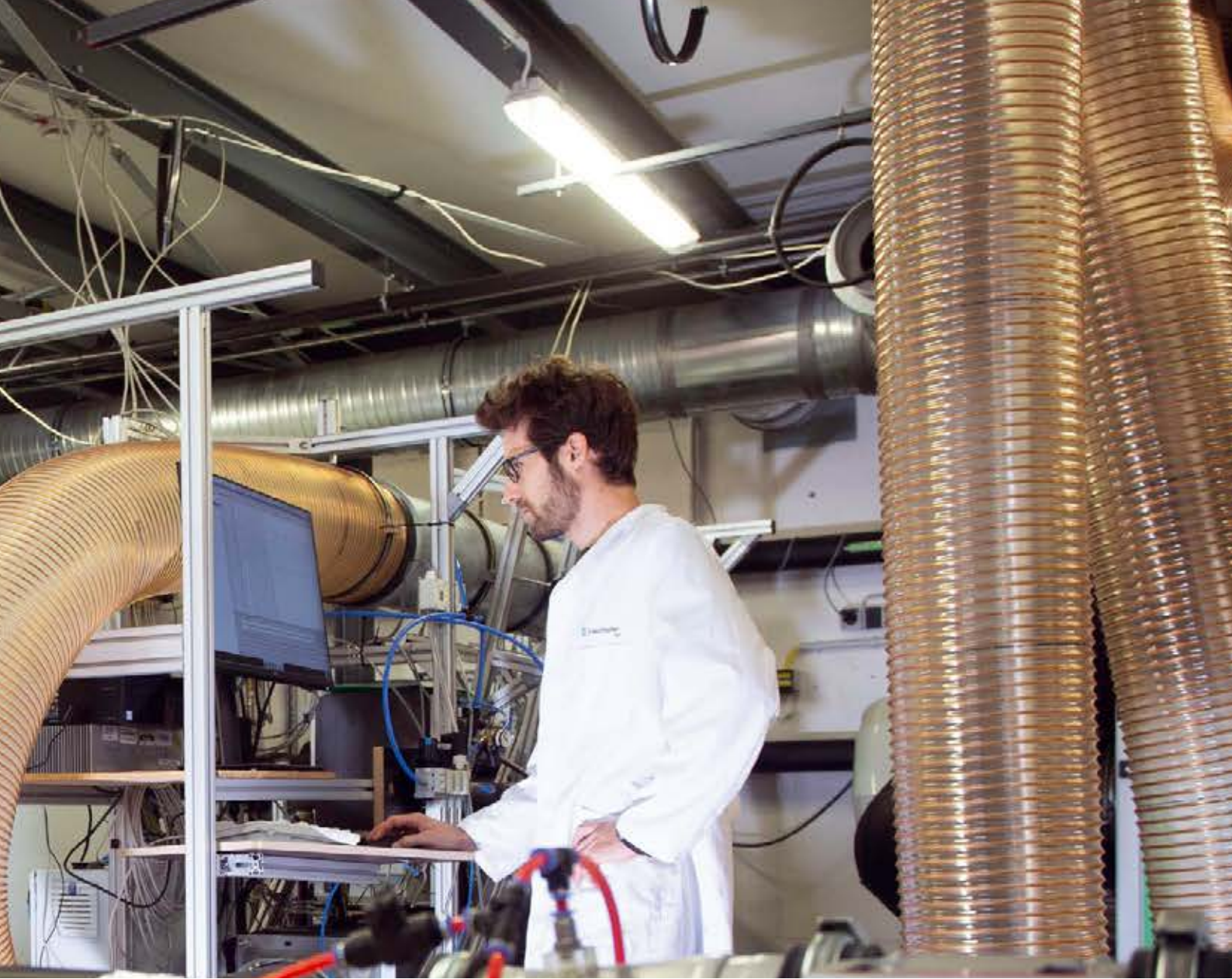


# ENERGIETECHNOLOGIEN UND -SYSTEME

*Teststände zur Charakterisierung von neuartigen Wärmeübertragern unterschiedlicher Skalen und Bauformen für den Einsatz in Fahrzeugen, bei der Gebäudeklimatisierung oder in Industrieprozessen.*

Solarstrom ist dank Forschung und Entwicklung sowie der Marktdynamik inzwischen die billigste Energiequelle. Weitere technologische Fortschritte sind auf dem Weg. Photovoltaik und Wind sind die Eckpfeiler der Energiewende. Ein deutlicher Ausbau der entsprechenden Anlagen in den vergangenen Jahren führte dazu, dass der Anteil erneuerbarer Energien zur Stromversorgung im Jahr 2019 in Deutschland auf 46 % 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 zunehmend auf Basis erneuerbarer Quellen hergestellt wird, sehr effizient direkt genutzt werden, wie z. B. in Wärmepumpen oder batterieelektrischen Fahrzeugen. Batterien als Kurzzeitspeicher spielen hier eine zentrale Rolle – in der Mobilität und in unterschiedlichsten stationären Anwendungen von Hausspeichern in Verbindung mit Photovoltaikanlagen bis hin zu Großspeichern in Erneuerbare-Energien-Kraftwerken. Die Entwicklung angepasster Batteriesysteme und deren nachhaltiger, sicherer Betrieb sind wichtige FuE-Themen. 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. Aufgrund 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. Der Elektrolyse kommt deshalb eine Schlüsselrolle zu, um erneuerbare Energien in eine stoffliche, gut speicherbare Energieform zu überführen. Die Nutzung des erzeugten Wasserstoffs reicht von der Anwendung in der Industrie (Chemie, Stahl) über die Herstellung synthetischer flüssiger Kraftstoffe bis zur Rückverstromung in Brennstoffzellen, insbesondere – aber nicht nur – für Anwendung in der Mobilität.

Solarthermische Verfahren ermöglichen die direkte Nutzung erneuerbarer Energie bei Wärmeanwendungen oder an sonnenreichen Standorten die Umwandlung in kostengünstig speicherbare Wärme mit hoher Temperatur für eine bedarfsgerechte Stromerzeugung. Auch diese Techniken, deren Anwendungsbereiche vor allem außerhalb Deutschlands und Europas liegen, stehen ebenso im Fokus unserer Arbeiten wie Verfahren zu einer ressourcenschonenden Nutzung von Wasser durch Verfahren der Wasseraufbereitung und -reinigung.

Das Fraunhofer ISE hat sich seit seiner Gründung mit vielen Technologien und Fragestellungen befasst, die in der gegenwärtigen zweiten Phase der Energiewende von höchster Relevanz sind und die im Bereich »Energietechnologien und -systeme« adressiert werden.



# ENERGIEEFFIZIENTE GEBÄUDE



**159**

Mitarbeitende

Energieeffiziente Gebäude spielen eine zentrale Rolle beim Klimaschutz: Über 40 % der Endenergie entfällt in Deutschland auf den Gebäudesektor. Für den Gebäudebetrieb müssen wir den Energiebedarf senken und diesen weitestgehend mit erneuerbaren Energien decken. Hier setzt das Fraunhofer ISE an: Unsere Forschungsarbeiten umfassen nahezu alle Lebensphasen eines Gebäudes von der Planung über die Errichtung bis hin zum Betrieb.



**15**

Zeitschriften- und Buchbeiträge

Wir forschen zur Reduktion des Raumwärme- und Raumkältebedarfs durch optimierte Gebäudehüllen und zur Integration erneuerbarer Energien. Neue Verglasungstechnologien, angepasste Sonnenschutzsteuerungen und farbige Abdeckscheiben für gebäudeintegrierte Photovoltaik bieten Architekten Vielfalt. Wir entwickeln dezentrale Lüftungssysteme sowie photovoltaisch-thermische Kollektoren, z. B. als Quelle einer Wärmepumpe.



**51**

Vorträge und Konferenzbeiträge

Für die Wärmeversorgung von Gebäuden sind Wärmepumpen unser Schwerpunkt. Für diese Technologie bieten wir die gesamte Wertschöpfungskette an: von der Komponentenentwicklung im Kältekreis, über die Geräte- und Anlagenentwicklung bis hin zur Qualitätssicherung im realen Betrieb. Schwerpunkte dabei sind die Optimierung von Wärmeübertragern und die Nutzung von natürlichen Kältemitteln, wie u. a. Propan.



**8**

Neu erteilte Patente

Sowohl für die Nutzung volatiler erneuerbarer Energien im Gebäude als auch für die Flexibilisierung des Wärmebedarfs zur Erhöhung eines netzdienlichen Gebäudebetriebs spielen thermische Speicher eine wichtige Rolle. Dabei sind Wärmespeicher wie auch Kältespeicher Schwerpunkte unserer Entwicklungen. Die Digitalisierung von Prozessen ist eine Schlüsseltechnologie zur Sektorenkopplung und zur Steigerung der Energieeffizienz. Die Planung mit digitalen Methoden, wie Building Information Modelling (BIM), hilft mit einer konsistenten semantischen Beschreibung den Informationsfluss im Lebenszyklus des Gebäudes sicherzustellen. Fehleranalysen mittels künstlicher Intelligenz sowie deren hard- und softwaretechnische Umsetzung sichern eine hohe energetische Qualität unter Einsatz erneuerbarer Energien.



Regelmäßige Infos zu den Meilensteinen unserer Forschung bieten unsere Newsletter!

## Meilensteine 2019

- » Mit Berufsschülern und Studierenden der Hochschule Offenburg aufgebaute Ausstellungscontainer SHK4Future, um das Verständnis für Innovationen im SHK-Handwerk zu fördern
- » Hardware-in-the-Loop-Teststand für vorrausschauende Regelung (Model Predictive Control) für Wärmepumpen in Betrieb genommen
- » Prototyp einer Sole-Wasser-Wärmepumpe mit nur 150 g Propan als Kältemittel leistet 8 kW Heizleistung und zeigt damit die Möglichkeiten der Innenaufstellung von Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln auf

*Bild: Das Fraunhofer ISE forscht an der energieeffizienten Enteisung der Lufteinheiten von Wärmepumpen mit Wärme aus dem Erdreich.*



[www.ise.fraunhofer.de/energieeffiziente-gebäude](http://www.ise.fraunhofer.de/energieeffiziente-gebäude)

## Ansprechpartner

### Energieeffiziente Gebäude

Dr. Peter Schossig | Telefon +49 761 4588-5130  
Dipl.-Ing. Sebastian Herkel | Telefon +49 761 4588-5117  
[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)

### Betriebsführung

Nicolas Réhault | Telefon +49 761 4588-5352  
[building.control@ise.fraunhofer.de](mailto:building.control@ise.fraunhofer.de)

### Gebäudesystemtechnik

Dr. Constanze Bongs | Telefon +49 761 4588-5487  
Dr. Peter Engelmann | Telefon +49 761 4588-5129  
[building.concepts@ise.fraunhofer.de](mailto:building.concepts@ise.fraunhofer.de)

### Niedertemperatur-Solarthermie

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

### Wärmepumpen

Dr. Marek Miara | Telefon +49 761 4588-5529  
[heatpumps@ise.fraunhofer.de](mailto:heatpumps@ise.fraunhofer.de)


### Wärme- und Kältespeicher


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


### Lüftung, Klima, Kälte


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


## Ausgewählte Projekte 2019


 **KoST** – Kostenoptimierung in der Solarthermie durch standardisierte Komponenten und Schnittstellen


 **BIM4Ren** – BIM-Tools und -Dienstleistungen für die Sanierung von Gebäuden


 **EnEff2050Begleit** – Begleitung der Förderinitiative »Innovative Vorhaben für den nahezu klimaneutralen Gebäudebestand 2050«


 **EnergieDigital** – Integrale TGA-Beschreibung in BIM für Planung und Betrieb energieeffizienter Gebäude

 **SHK4FutureEnergysystems** – Tiny-House als mobiler Showroom für moderne Gebäudetechnik

 **Thermogewebe** – Gestaltung und Charakterisierung von drahtgewebebasierten Mikrowärmeübertragern

 **CRAVEzero** – Kostenreduktion und Beschleunigung der Marktdurchdringung für nachhaltige Nahezu-Nullenergiegebäude

 **WPVt-Freeze** – Wärmepumpe-Heizsysteme mit quellenseitig installierten PVT-Kollektoren

 **WPsmart im Bestand** – Wärmepumpenfeldtest – Fokus Bestandsgebäude und smarterer Betrieb

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







## Wärmepumpensysteme für Mehrfamilienbestandsgebäude

Dr. Constanze Bongs | Telefon +49 761 4588-5487  
building.concepts@ise.fraunhofer.de

Um die klimapolitischen Ziele Deutschlands zu erreichen, müssen die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Wärmeversorgung von Gebäuden massiv gesenkt werden. Dazu bietet sich vor allem der Einsatz von Wärmepumpen als Wärmeversorgungstechnik an. In neu errichteten Gebäuden werden Wärmepumpen bereits häufig eingebaut. Im großen Sektor der Bestandsgebäude hinkt dagegen ihr Einsatz mit einem geschätzten Anteil von 6 % (Neuanlagen) deutlich hinterher. Mehrfamilienbestandsgebäude sind hier besonders stark unterrepräsentiert. In unserem Forschungsthema »LowEx im Bestand« entwickelt das Fraunhofer ISE gemeinsam mit Industriepartnern Lösungsansätze für die hier geltenden besonderen Herausforderungen.

Eine dieser technischen Schwierigkeiten ist die in Mehrfamiliengebäuden eingeschränkte Verfügbarkeit von Wärmequellen. Im Projekt »Heaven« arbeiten wir daher an der Entwicklung von Mehrquellensystemen, die Luft und Erdwärme kombinieren. Die Dimensionierung und der Betrieb der einzelnen Wärmequellen kann somit flexibler ausgestaltet werden. Zu den Vorteilen gehört die Regenerierung und Schonung der Erdwärmesonde in Zeiten hoher Außenlufttemperaturen. Zudem kann die Außenlufteinheit geräuschoptimiert betrieben werden. In umfangreichen Labortests konnten wir nachweisen, dass es möglich ist, die Lufteinheit mit Wärme aus dem Erdreich zu enteisen. Die hydraulische Kopplung der Quellen erlaubt damit einen energieeffizienten Abtaubetrieb.

1 Gezielte Vereisung einer Wärmepumpen-Außeneinheit im Laborversuch.

## Klimafreundliche Propan-Wärmepumpe für Innenräume

Dr. Lena Schnabel | Telefon +49 761 4588-5412  
heatpumps@ise.fraunhofer.de

Wärmepumpen werden eine zentrale Heizungstechnologie der Zukunft sein. Derzeit nutzen sie jedoch noch überwiegend Kältemittel mit umweltschädlichen Treibhausgasen. Schon ab 2020 treten gemäß der entsprechenden EU-Verordnung Verwendungsverbote für Kältemittel in Kraft, deren »Global Warming Potential« (GWP) den Wert 2500 übersteigt. Daher forscht das Fraunhofer ISE an klimafreundlichen, alternativen Kältemitteln für Wärmepumpen. Propan hat ein GWP von 3 und ist weltweit kostengünstig verfügbar, es ist aber brennbar. Übersteigt eine Wärmepumpe im Einfamilienhaus mit ihren üblichen 5–10 kW Leistung die vorgeschriebene Höchstmenge von 150 g Propan, kann sie daher nur mit hohen, kostenaufwendigen Sicherheitsanforderungen installiert werden.

Dem Fraunhofer ISE ist es gelungen, den Prototyp einer neuen Erdwärmepumpe zu bauen, der bei gleicher Leistung nur ein Viertel der Kältemittelmenge im Vergleich zu marktverfügbaren Systemen benötigt. Eine darauf aufbauende Propan-Wärmepumpe wäre damit die erste in Deutschland, die ohne zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen in Innenräumen von Wohngebäuden aufgestellt werden dürfte. Sie erreicht mit 150 g Propan rund 8 kW Heizleistung (Betriebspunkt B0/W35). Für den Prototyp kamen marktverfügbare Komponenten zum Einsatz, die unter der Maßgabe einer geringen Füllmenge ausgelegt wurden. Zentrale Bedeutung hatte dafür die Nutzung asymmetrischer Plattenwärmeübertrager sowie die Reduzierung der Rohrleitungslängen, da sich hier der überwiegende Anteil des flüssigen Kältemittels befindet.

2 Prototyp der LC 150 Low Charge Heat Pump im Wärmepumpenlabor des Fraunhofer ISE.





## Neues Rathaus Freiburg als Netto-Nullenergiegebäude

Dr. Peter Engelmann | Telefon +49 761 4588-5129  
building.concepts@ise.fraunhofer.de

Seit Ende 2017 betreibt die Stadt Freiburg mit ihrem neuen Rathaus eines der europaweit größten Gebäude (EBF 23 000 m<sup>2</sup>) mit Nullenergie-Vorgabe. Primärenergetisch bilanziert erzeugt ein Netto-Nullenergiegebäude in der Jahresbilanz so viel Energie, wie es selbst benötigt. Bilanzgrenze für die Primärenergiebilanz ist nach Energieeinsparverordnung (EnEV) der zu betrachtende Energiebedarf für Heizung, Lüftung, Beleuchtung, Kühlung und Trinkwassererwärmung.

Zum Ausgleich des Energiebezugs wird am Rathaus nahezu die gesamte Gebäudehülle zur Energiegewinnung mit Photovoltaik genutzt. Für die Trinkwassererwärmung kommen photovoltaisch-thermische Kombikollektoren (PVT) mit einem Spitzenlastgaskessel zum Einsatz. Die Niedertemperatur-Wärmeversorgung basiert auf grundwassergekoppelten Wärmepumpen, die Kühlung erfolgt über Grundwasserbrunnen. Wärme und Kälte werden größtenteils durch Betonkernaktivierung in Kombination mit Deckensegeln an die Räume übergeben, sodass mit niedrigen Temperaturdifferenzen geheizt und gekühlt wird.

Nach einem vollständigen Betriebsjahr zeigt eine Analyse des Monitorings, das am Fraunhofer ISE durchgeführt wurde, dass das Netto-Nullenergieziel 2018 nahezu erreicht worden ist. Optimierungspotenziale im Bereich des Betriebs der Wärmepumpen und der PV-Anlage wurden identifiziert und deren Umsetzung wird sich auf die Bilanz für das Jahr 2019 bereits positiv auswirken. Zudem wurden die dynamischen Lastprofile von Bedarf und Erzeugung untersucht und Möglichkeiten für ein netzdienliches Betriebskonzept erarbeitet.

1 *Rathaus im Stühlinger in Freiburg mit fassadenintegrierter Photovoltaik und Photovoltaik auf dem Dach.*

## Überwachung gebäudetechnischer Anlagen mit KI und Nutzer-Feedback

Dr. Gesa Benndorf | Telefon +49 761 4588-5136  
building.control@ise.fraunhofer.de

Gebäudetechnische Anlagen werden in vielen Fällen nicht optimal betrieben. Fehler oder suboptimale Betriebsweisen können zu unverhältnismäßigen Energieverbräuchen, reduziertem Komfort, vorzeitigem Verschleiß einzelner Komponenten und erhöhten Kosten führen. Am Fraunhofer ISE werden seit Jahren Methoden entwickelt, die – ausgehend von Messdaten der entsprechenden Anlagen – Fehler und unerwartete Abweichungen (Ausreißer) automatisiert erkennen und aussagekräftige Meldungen für den Betreiber der Anlage generieren.

Nun wurde ein Verfahren zum Patent angemeldet, das einerseits Methoden der künstlichen Intelligenz nutzt, und andererseits das Domänenwissen von Experten einbezieht, um fehlerhafte Anlagenzustände frühzeitig zu erkennen. Das Vorhaben wurde durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) gefördert. Das Verfahren ermöglicht es, den Anlagenbetrieb unmittelbar nach der Inbetriebnahme, ohne lange Trainings- und Einregulierungszeiten, automatisiert zu überwachen und den Nutzer (z. B. den Facility-Manager) auf Auffälligkeiten hinzuweisen. Der Nutzer hat die Möglichkeit, erkannte Fehler oder Ausreißer zu bestätigen und entsprechend zu reagieren oder zu verwerfen. Das entwickelte Verfahren nutzt diese Information, um seine Genauigkeit kontinuierlich zu verbessern und sich den – möglicherweise veränderten – Gegebenheiten anzupassen.

Das Verfahren ist so konzipiert, dass das benötigte Nutzer-Feedback minimal ist und im Verlauf der Anwendung rasch abnimmt, wobei gleichzeitig die Präzision kontinuierlich steigt.

2 *Anwendung eines adaptiven Verfahrens zur Detektion eines fehlerhaften Betriebszustands in einem Kühlturm.*



1



2

## Sonnen- und Wärmeschutzschichten für die Membranarchitektur

Dr. Christina Hildebrandt | Telefon +49 761 4588-5988  
building.envelope@ise.fraunhofer.de

Low-e- und SolarControl-Beschichtungen für Fenster und Glasfassaden sind heutzutage Stand der Technik. In der Membranarchitektur hingegen fehlen bislang vollflächige funktionale Schichten, was eine schlechtere Energieeffizienz der Membrangebäude zur Folge hat. Das Fraunhofer ISE forscht daher an neuartigen Membranen.

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekt »follow-e2« z. B. wurde zusammen mit den Projektpartnern ROWO Coatings, Dunmore Europe, 2construct und der HFT Stuttgart ein Produktportfolio von beschichteten ETFE-Folien für Membrangebäude in verschiedenen Klimata entwickelt. Da in den Folienkissen deutlich härtere Umgebungsbedingungen vorliegen als in einem Fenstersystem, werden die funktionalen PVD-Schichten mit einem Schutzlack kombiniert. Die funktionale PVD-Schicht selbst besteht aus einer dünnen Silberschicht, die in Haft- und Barrierschichten eingebettet ist. Die Stabilität der Schichtsysteme gegenüber Feuchte, Kondensation, Temperaturbelastung und Salznebel sowie unter Dehnung konnte nachgewiesen werden. Auch die Stabilität der beschichteten Folien über die gesamte Verarbeitungskette hinweg vom Verschweißen der beschichteten Folien zu Membrankissen bis zum Transport und Einbau auf der Baustelle wurde untersucht und positiv beurteilt. Mögliche Schäden während des Herstellungsprozesses, wie z. B. tiefere Kratzer, können mit einem im Projekt identifizierten Reparaturlack versiegelt werden. Die Beschichtungsprozesse wurden auf zwei Produktionslinien bei den Projektpartnern ROWO Coatings und Dunmore Europe aufskaliert.

1 Mit PVD und Schutzlack beschichtete ETFE-Folienrolle im Umwickler bei ROWO Coatings.

## Europäische Prüfnormen für Heizungsprodukte auf dem Prüfstand

DI Ivan Malenković | Telefon +49 761 4588-5533  
testlab-hpc@ise.fraunhofer.de

Um die Energieeffizienz von Gebäuden zu steigern und so die Klimapolitischen Ziele zu erreichen, hat die Europäische Union eine Reihe von Richtlinien erlassen, die neue Anforderungen an energieverbrauchende Produkte stellen. Dabei kommt Heizungs- und Brauchwarmwassergeräten eine besondere Rolle zu, da sie für etwa ein Drittel des Endenergieverbrauchs in der EU verantwortlich sind.

Die unabhängige Bewertung und fundierte Qualitätssicherung dieser Produkte sind eine wichtige Voraussetzung für einen fairen Wettbewerb neuer, energieeffizienter Technologien. Dies wird durch standardisierte Prüfverfahren garantiert. Die zugrunde liegenden nationalen und internationalen Prüfnormen – die auch in den einschlägigen EU-Richtlinien, wie z. B. Ökodesign- oder Energieverbrauchskennzeichnung-Richtlinie, festgelegt sind – werden 2020 grundlegend revidiert.

Dazu wurden zunächst die Prüfmethode und Normen im Rahmen des Projekts »EcoTest« in einer Reihe von europäischen Ringversuchen validiert. Namhafte akkreditierte Prüfinstitute erarbeiteten daraufhin Verbesserungsvorschläge.

Das Fraunhofer ISE war dabei federführend verantwortlich für verschiedene Arten elektrisch angetriebener Wärmepumpen, darunter auch Hybrid-Wärmepumpen. Zudem waren wir an der Vermessung von solarthermischen Kollektoren und Systemen sowie Gas-Sorptionswärmepumpen maßgeblich beteiligt.

2 Akkreditierte Messung einer Wärmepumpe im TestLab Heat Pumps and Chillers.



## MorphoColor®: Stele zur Demonstration von farbigen BIPV-Modulen

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

Für die Energiewende werden große Flächen zur Installation der notwendigen Photovoltaikmodule benötigt. An und auf Gebäuden stehen ausreichend große, potenziell ertragbringende Flächen zur Verfügung. An vielen Einsatzorten, ganz besonders aber bei der Integration in Gebäudefassaden, müssen die PV-Module architektonisch gestaltbar sein, um die Anforderungen an das Stadtbild und die Architektur des Gebäudes zu erfüllen. Gleichzeitig müssen die Module hohen Ertrag bringen, um die CO<sub>2</sub>-Bilanz des Gebäudes signifikant zu verbessern und die Energiebilanz idealerweise auf Null zu reduzieren (»Netto-Nullenergiegebäude«) oder sogar ins Positive zu wenden (»Plusenergiegebäude«).

Das Fraunhofer ISE leistet umfangreiche FuE-Arbeiten zu gebäudeintegrierter Photovoltaik. Eine neue Stele am Haupteingang des Fraunhofer ISE zeigt verschiedene, hocheffiziente BIPV-Module mit patentierter MorphoColor® Farbschicht und innovativen Schindelzellen. Die MorphoColor® Farbschicht ist eine photonische Struktur, bei der eine Interferenzschicht so mit einem geometrisch strukturierten Substrat kombiniert wird, dass sich ein schmalbandiger Reflexionspeak ergibt, der nur eine bestimmte Farbe reflektiert und das restliche Sonnenlicht quasi ungestört passieren lässt. Das Design der Schicht ist durch die Farbschicht auf den Flügeln des Morpho-Schmetterlings inspiriert, dessen intensiv blaue Flügel einen in weiten Bereichen winkelstabilen Farbeindruck erzeugen. Durch die Schmalbandigkeit des Reflexionspeaks verringert die Farbschicht die Effizienz des Moduls nur um deutlich weniger als 10 %<sub>rel</sub>, verglichen mit einem schwarzen Modul. Die farbigen Module liefern also mindestens 90 % der Erträge, die ein schwarzes Modul an gleicher Stelle liefern würde.

Eine weitere Innovation bei den Modulen stellt die verwendete Technologie zur elektrischen Verschaltung der einzelnen Zellen dar. Die hierzu verwendete Schindeltechnologie ermöglicht durch überlappende Zellen, die Modulfläche ohne Lücken zu belegen, wodurch der Wirkungsgrad und die Erträge gesteigert werden und ein einheitlich schwarzes Erscheinungsbild ohne silbrige Zellverbinder entsteht. Das einheitlich schwarze Erscheinungsbild ist Voraussetzung für einen homogenen Farbeindruck, da reflektierende oder glänzende Elemente den Farbeindruck stören würden.

Die Stele demonstriert somit, wie innovative Technologien dazu beitragen können, dass solar aktivierte Gebäudehüllen ein selbstverständliches Element werden, mit dem sich CO<sub>2</sub>-neutrale und architektonisch ansprechende Gebäude gestalten lassen.

<sup>1</sup> Pilotinstallation von MorphoColor® Farbschichten an der BIPV-Demonstrations-Stele vor dem Hauptgebäude des Fraunhofer ISE in Freiburg.



# SOLARTHERMISCHE KRAFTWERKE UND INDUSTRIEPROZESSE



**61**

Mitarbeitende



**10**

Zeitschriften- und Buchbeiträge



**11**

Vorträge und Konferenzbeiträge



**1**

Neu erteiltes Patent

In sonnenreichen Regionen liefern solarthermische Kraftwerke (Concentrated Solar Power, CSP) schon heute bedarfsgerecht erneuerbaren Strom durch den Einsatz großer thermischer Speicher. Besonders in Kombination mit kostengünstigem PV-Strom wird die Speicherfähigkeit der CSP in Netzen mit zunehmenden Anteilen an fluktuierenden erneuerbaren Energien weiter an Bedeutung gewinnen. Gemeinsam mit unseren Partnern forschen wir an Materialien, Beschichtungen, Komponenten, Kollektoren und Systemen, um die Effizienz weiter zu erhöhen und Herstellungskosten weiter zu senken. Auch der kosteneffiziente und ressourcenschonende Betrieb der Anlagen ist Gegenstand aktueller Arbeiten.

Thermische Speicher bieten auch in industriellen Prozessen große Chancen, Prozesse effizienter und Energieflüsse flexibler zu gestalten. Neben konkreten Speicherlösungen und Energieeffizienzmaßnahmen arbeiten wir an der Einbindung solarer Prozesswärme in die Wärmeversorgung industrieller Prozesse. Die effiziente Wandlung und Übertragung thermischer Energie kann weitere Beiträge zur Dekarbonisierung von Industrieprozessen liefern. Deshalb bilden auch effiziente Wärmeübertrager sowie Materialien und Komponenten hierfür einen Schwerpunkt unserer Arbeiten. Fragen der Be- und Entfeuchtung bilden den Übergang zu den Arbeiten zur Wasseraufbereitung. Neben der Gewinnung von Trinkwasser aus Meer- oder Brackwasser arbeiten wir an der Reinigung oder Aufkonzentrierung von Reststoffen in industriellen Abwässern.

Am Fraunhofer ISE verfügen wir über profunde Kompetenzen in Materialwissenschaften, Komponentendesign, Charakterisierung und Prüfverfahren, Modellierung und Simulation, Anlagenregelung und Systementwicklung und können dabei auf langjährige Erfahrungen aus Projekten für Anwendungen in solarthermischen Kraftwerken und in verschiedenen Industriezweigen zurückgreifen. In unseren Entwicklungen rücken auch die Digitalisierung, Industrie 4.0 und additive Fertigung zunehmend in unser Blickfeld.



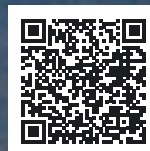
Regelmäßige Infos zu den Meilensteinen unserer Forschung bieten unsere Newsletter!

*Bild: Turmkraftwerk Ivanpah, USA. Das Fraunhofer ISE arbeitet an der Optimierung von Komponenten, Regelung, Wartung und Betrieb solarthermischer Turmkraftwerke.*

## Meilensteine 2019

- » Neues Wärmetauscherkonzept »ProLatent« für Wärmespeicher auf Basis von Phasenwechselmaterialien
- » Erfolgreicher Praxistest des neuen Regel- und Kalibrierverfahrens »HelioControl« für Heliostaten in solarthermischen Turmkraftwerken
- » Workshop zu Projektergebnissen »RAISELIFE«, detaillierte Modellierung von Degradationen und resultierende Optimierungen
- » Anlagen-Prototypen zur Aufbereitung industrieller Abwässer ausgeliefert im Projekt »ReWaCEM«
- » Trainings und Projektanbahnung zu solarer Prozesswärme im Projekt »Solar Payback«
- » Industrieworkshop für die CSP-Industrie im Projekt »SFERA-III«





[www.ise.fraunhofer.de/solarthermische-kraftwerke-und-industrieprozesse](http://www.ise.fraunhofer.de/solarthermische-kraftwerke-und-industrieprozesse)

## Ansprechpartner

### Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse

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

### Solarthermische Kraftwerke

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

### Konzentrierende Kollektoren

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

### Wasseraufbereitung und Stofftrennung

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

### Thermische Speicher für Kraftwerke und Industrie

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


### Industrieprozesse und Prozesswärme


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

### Effiziente Wärmeübertrager


Dr. Lena Schnabel | Telefon +49 761 4588-5412  
building.airconditioning@ise.fraunhofer.de


## Ausgewählte Projekte 2019


 HelioGLOW – Entwicklung von Komponenten für ein solarthermisches Turmkraftwerk


 SFERA-III – Solar Facilities for the European Research Area – Third phase


 ReWaCEM – Resource Recovery from Industrial Waste Water by Cutting Edge Membrane


 SOLSEC – Sekundärreflektoren für Turmreceiver


 AVUSpro – Automatisierte in situ Messung von Verschmutzung zur Standortbewertung und im Betrieb solarthermischer Kraftwerke

 RAISELIFE – Raising the Lifetime of Functional Materials for Concentrated Solar Power Technology

 Sinotrough – Parabolrinnen-Technologie für ein nachhaltiges Energiesystem in China

 FENOPTHES – Füllkörperentwicklung und -optimierung für thermische Speicher

 GeoSmart – Technologies for Geothermal Power Plants to Enhance Competitiveness Through Smart and Flexible Operation

 HelioControl – Entwicklung eines kamerabasierten Kalibrier- und Regelungssystems mit geschlossenem Regelkreis für Heliostatenfelder

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





## Lebenszyklus-Simulation von solarthermischen Kraftwerken

Theda Zoschke | Telefon +49 761 4588-5936  
soltherm.systems@ise.fraunhofer.de

Dynamische Systemmodelle mit hohem Detaillierungsgrad sind erforderlich, um den Betrieb solarthermischer Kraftwerke für einen möglichst hohen Ertrag zu optimieren. Schon seit über 20 Jahren werden am Fraunhofer ISE dynamische Systemsimulationen mit der Simulationsumgebung »ColSim CSP« durchgeführt. Die Komponenten-Bibliothek wurde dabei stetig um neue Bauteile und Funktionalitäten ergänzt. In den letzten Jahren haben wir die Simulationsumgebung so erweitert, dass viele Jahre in Folge simuliert und damit auch Alterungsprozesse von Komponenten/Materialien berücksichtigt werden können.

Solarthermische Kraftwerke werden in ariden Gegenden betrieben, in denen Wasser oft knapp ist. Daher haben wir auch Modelle für den Wasserverbrauch im Kraftwerk inklusive Spiegelreinigung, der Wasser- und Abwasserströme und den Aufbereitungseinheiten in die Simulation integriert. Die Eigenschaften der Kollektoren oder Heliostaten (z. B. der Verschmutzungsgrad) können dabei orts aufgelöst im Feld abgebildet werden.

Die Simulationen unter Berücksichtigung von Materialdegradation und detailliertem Wassermanagement ermöglichen neue Optimierungen des Anlagenbetriebs und eine techno-ökonomische Bewertung neuer Betriebskonzepte. So bestimmen wir das optimale Intervall für Neubeschichtungen von Turmreceivern, was die Stromgestehungskosten minimiert, oder untersuchen die Ersparnisse durch die Wiederverwendung von aufbereitetem Blow-Down-Wasser für die Spiegelreinigung.

1 *In Detailsimulationen optimiert das Fraunhofer ISE die Betriebsstrategien solarthermischer Turmkraftwerke.*

## 3D-Laserscanning zur Vermessung von Heliostaten im Solarfeld

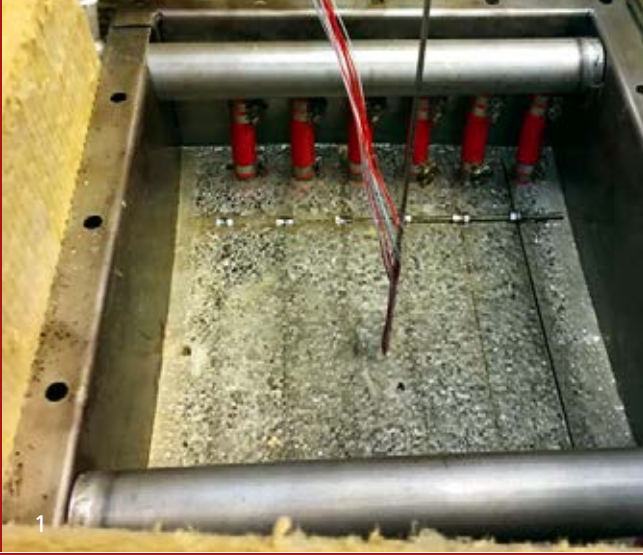
Anna Heimsath | Telefon +49 761 4588-5944  
soltherm.collectors@ise.fraunhofer.de

Heliostaten sind zweiachsig nachgeführte Spiegelsysteme, die in solarthermischen Turmkraftwerken das Sonnenlicht auf einen feststehenden Receiver an der Turmspitze konzentrieren. Die große Entfernung zum Receiver erfordert eine hohe Formstabilität und Präzision des Heliostaten. Die Trägerstruktur der bis zu 150 m<sup>2</sup> großen Spiegelfläche beeinflusst die Stückkosten und die Wirtschaftlichkeit des gesamten Systems.

Die präzise Messung der Spiegelformtreue in unterschiedlichen Heliostatenausrichtungen kann die Optimierung der Struktur unterstützen. Andere Techniken wie Deflektometrie oder Photogrammetrie sind zum Teil nur sehr aufwendig im Solarfeld anzuwenden. Deswegen entwickelt das Fraunhofer ISE gemeinsam mit der Industrie eine weitere Methode: Die Spiegel werden temporär mit Sprühkreide vorbereitet, um mit präzisiertem 3D-Laserscanner und Kamera die Oberfläche flexibel und in verschiedensten Stellpositionen vermessen zu können.

So wurde z. B. im EU-Projekt »RAISELIFE« ein Heliostatenprototyp mit innovativen Kompositspiegeln untersucht. Der Einfluss der Schwerkraft auf die Spiegelform bei verschiedenen Ausrichtungen der Spiegel wurde zwischen vertikal (kein Einfluss) bis horizontal (maximaler Einfluss) vermessen. Die Analyse zeigte die Verformung der Stützstruktur und die Durchbiegung des Spiegels. Ersteres hatte bei dem Prototypen einen größeren Einfluss und kann im nächsten Entwicklungsschritt verbessert werden.

2 *Vermessung eines Heliostaten.*



## Wärmeübertrager in Latentwärmespeichern charakterisieren

Stefan Gschwander | Telefon +49 761 4588-5494  
 building.thermal-storage@ise.fraunhofer.de

Das Fraunhofer ISE führt im Labormaßstab umfangreiche experimentelle Charakterisierungen von Wärmeübertragern in Latentwärmespeichern durch. Dabei stehen deren Leistung und Effizienz im Fokus unserer Untersuchungen. Wir nutzen dazu verschiedene Phasenwechselmaterialien (Phase Change Materials – PCM) von Wasser/Eis bis Zuckeralkohole, die bei bis zu 200 °C schmelzen. Zur Charakterisierung werden dem Vorlauf des Wärmeübertragers Temperatursprünge um die jeweilige Schmelz- und Kristallisationstemperatur aufgeprägt. Wir messen den resultierenden Temperaturverlauf im PCM sowie im Rücklauf des Wärmeübertragers und analysieren ihn so hinsichtlich der thermischen Leistung. So haben wir z. B. in den von Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Projekten »[Thermogewebe](#)« und »[Prolatent](#)« Wärmeübertrager auf Basis von Metallgeweben bzw. Platten untersucht. Als PCM kamen Wasser/Eis, Paraffine und Zuckeralkohole zum Einsatz.

In unseren Experimenten untersuchen wir verschiedene Wärmeübertrager (Materialien, Geometrien) und variieren neben dem PCM jeweils den Massenstrom durch den Wärmeübertrager sowie die Höhe des aufgeprägten Temperatursprungs. Aus den Messergebnissen wird die thermische Leistung normiert auf die Wärmeübertragungsfläche und die logarithmische Temperaturdifferenz zwischen Wärmeträgerflüssigkeit und PCM berechnet. So lassen sich verschiedene Wärmeübertragertechnologien miteinander vergleichen, bewerten und Optimierungen vornehmen.

1 *Sicht auf einen offenen Latentwärmespeicher mit Plattenwärmübertrager (eingetaucht in das PCM).*

## Rückgewinnung von Säuren und Salzen aus Industrieabwässern

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

Die Aufbereitung und Wiederverwendung von Abwasserströmen und Prozessfluiden ist die Voraussetzung für die Schließung von Stoffkreisläufen in der Industrie. Bei der Aufbereitung von Abwasser zu Frischwasser z. B. durch Umkehrosmose können sehr große Anteile (>90 %) Frischwasser zurückgewonnen werden. Es bleibt aber ein hoch belasteter Konzentratstrom zurück. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unterstützten und von der TU Berlin koordinierten Projekts »[HighCon](#)« haben wir am Fraunhofer ISE eine mehrstufige Demonstrationsanlage aufgebaut, mit der verschiedenste industrielle Abwässer bis an die Sättigungsgrenze aufkonzentriert und Salze teilweise selektiv abgeschieden und wiederverwendet werden können. Wir haben u. a. eine intelligente Verschaltung von Nanofiltration, Elektrodialysemethathese und Membrandestillation entwickelt.

In der Oberflächenbehandlung der stahlverarbeitenden Industrie fallen große Mengen säurehaltiger Prozessfluide an, von denen regelmäßig Wasser-Restsäure-Metallsalzgemische ausgeschleust und entsorgt werden müssen. In dem vom Fraunhofer ISE koordinierten EU-Projekt »[ReWaCEM](#)« wurden Anlagen basierend auf Diffusionsdialyse und Membrandestillation entwickelt, mit denen Restsäuren aus Abwässern zu einem sehr großen Anteil (>90 %) zurückgewonnen, aufkonzentriert und den Beizbädern wieder zugeführt werden können. Die im Reststrom verbliebenen Metallsalze werden ausgefällt und wiederverwertet. Wir haben dafür drei Anlagen zur Rückgewinnung von Schwefelsäure in der Galvanik, Salzsäure in der Feuerverzinkung und HF-HNO<sub>3</sub>-Mischsäuren in der Edelstahlbeize gebaut und im Feld installiert.

2 *Im Projekt »ReWaCEM« entwickelte Demonstrationsanlage zur Rückgewinnung von Säuren und Metallsalzen aus Beizbädern.*



# WASSERSTOFFTECHNOLOGIEN UND ELEKTRISCHE ENERGIESPEICHER



**145**

Mitarbeitende



**7**

Zeitschriften- und Buchbeiträge



**35**

Vorträge und Konferenzbeiträge



Regelmäßige Infos zu den Meilensteinen unserer Forschung bieten unsere Newsletter!

*Bild: CATVAP (Catalytic Evaporation Process) in Stackbauweise für die Emissionsreduzierung und Effizienzsteigerung in Verbrennungsmotoren.*

In diesem Geschäftsfeld bieten wir FuE-Leistungen zur Erzeugung, Wandlung sowie thermochemischen Weiterprozessierung von Wasserstoff. Bei der elektrochemischen Wasserstofferzeugung liegt unser Schwerpunkt auf Fragestellungen zur Wasserspaltung durch Strom in Polymerelektrolyt-Membran-Elektrolyseuren (PEM). Ebenfalls mit der PEM-Technologie entwickeln wir Brennstoffzellensysteme, besonders für den Mobilitätssektor. Wir betreiben für Wasserelektrolyseure und Brennstoffzellen multiphysikalische Simulationen und grundlegende elektrochemische Charakterisierungen von Zellen und Stacks. Unsere Arbeiten umfassen Entwicklung, Simulation und Testen von Einzelzellen, Zellstapeln und Gesamtsystemen, ebenso wie das Testen von Peripherie- und Zellkomponenten unter allen real vorkommenden Klimabedingungen. Weiterhin synthetisieren wir mit eigens entwickelten Katalysatoren Wasserstoff und Kohlendioxid mit thermochemischen Verfahren zu flüssigen Kraftstoffen und Chemikalien (Power-to-Liquids). Durch diese Verfahren ermöglichen wir die Kopplung der nachhaltigen Stromproduktion über die Wasserelektrolyse mit anderen Sektoren, z. B. Mobilität und Chemie.

Für Batteriematerialien, -zellen, -module und -systeme bieten wir FuE-Leistungen basierend auf gängigen und zukünftigen Technologien an. Dies umfasst die Analyse und die Erforschung neuer Materialzusammensetzungen und Zellarchitekturen, die Untersuchung neuer Fertigungsverfahren, den Aufbau von Batteriezellen sowie deren Formierung und Charakterisierung. Wir analysieren Alterungsmechanismen und Möglichkeiten, die Zyklenfestigkeit und die kalendrische Lebensdauer zu steigern. Für unser Batterietest-Labor ist eine Akkreditierung bei der DAkkS (Deutsche Akkreditierungsstelle) geplant, sodass wir ab 2020 auch akkreditierte Messungen anbieten können. Wir entwickeln zudem komplette Batteriesystemprototypen inklusive thermischem Management und Batteriemangement. Darüber hinaus begleiten wir unsere Partner im Rahmen von Feldprojekten bei der Integration in die verschiedensten Anwendungen und bei der zugehörigen Qualitätssicherung. Dazu zählen stationäre gewerblich und industriell genutzte Batteriespeicher genauso wie die Elektromobilität, angefangen von elektrischen Leichtfahrzeugen über PKWs bis hin zur Elektrifizierung bzw. Hybridisierung von Schiffen.

## Meilensteine 2019

- » Vergleichsstudie Treibhausgas-Emissionen von Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeugen
- » Start des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) geförderten Verbundvorhabens »LiBatt – Feste Lithiumbatterien mit Vliesstoffen«
- » Vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) unterstütztes Verbundvorhaben »EMILAS – Elektromobilität in Mehrfamilienhäusern durch intelligente Ladestationen mit Second-Life Batteriespeicher« gestartet
- » Fraunhofer ISE wichtiger Partner im 2019 gestarteten Projekt des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) zum Aufbau einer Forschungsfabrik Batteriezellfertigung





[www.ise.fraunhofer.de/wasserstofftechnologien-und-elektrische-energiespeicher](http://www.ise.fraunhofer.de/wasserstofftechnologien-und-elektrische-energiespeicher)

## Ansprechpartner

### Wasserstofftechnologien

Prof. Dr. Christopher Hebling | Telefon +49 761 4588-5195  
h2fc.hydrogen@ise.fraunhofer.de

### Thermochemische Prozesse

Dr. Achim Schaadt | Telefon +49 761 4588-5428  
h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de

### Elektrolyse und Power-to-Gas

Dr. Tom Smolinka | Telefon +49 761 4588-5212  
h2fc.electrolysis@ise.fraunhofer.de

### Brennstoffzellensysteme

Dipl.-Ing. Ulf Groos | Telefon +49 761 4588-5202  
h2fc.systems@ise.fraunhofer.de

### Elektrische Energiespeicher

Dr. Matthias Vetter | Telefon +49 761 4588-5600  
batteries@ise.fraunhofer.de

### Batteriezellentechnologie

Dr. Daniel Biro | Telefon +49 761 4588-5246  
batteries.cell@ise.fraunhofer.de











### Batteriesystemtechnik

Stephan Lux | Telefon +49 761 4588-5419  
batteries.system@ise.fraunhofer.de

### Angewandte Speichersysteme

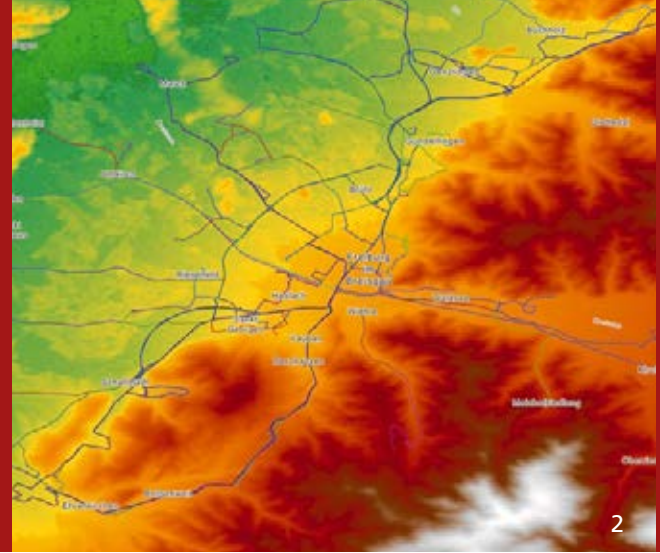
Johannes Wüllner | Telefon +49 761 4588-2129  
batteries.application@ise.fraunhofer.de

## Ausgewählte Projekte 2019

-  **HAIMa** – H<sub>2</sub>- & Kationen-Kontamination: Alterungs-Effekte, Material- und Sensorentwicklung
-  **DSW** – Planung und Machbarkeit für eine direkte solare Wasserstoffherzeugung für die Mobilität
-  **Leuchtturmprojekt Power-to-Gas** – Ökonomische Erzeugung von ökostrombasiertem Wasserstoff
-  **FrHyBus** – Potenzial von Wasserstoff-Brennstoffzellenbussen im ÖPNV im Großraum Freiburg
-  **LiteFCBike** – Brennstoffzellensystem für einen E-Gepäckträger
-  **EnStadt: Pfaff** – Innovative Photovoltaik-DC-Ladeinfrastruktur mit Pufferspeicher
-  **Kopernikus-Projekt Power-to-X** – Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen für dezentrale, hochwertige Anwendungen
-  **Rural-Li** – Robuste Lithiumbatteriesysteme für den Einsatz in PV-Insulanlagen kleinerer Leistung
-  **REACT** – Renewable Energy for Self-Sustainable Island Communities
-  **EMILAS** – Elektromobilität in Mehrfamilienhäusern durch intelligente Ladestationen mit 2nd-life-Batteriespeicher

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





## GIS-basierte Bewertung von Wasserstoff- und PtG-Infrastruktur

Nikolas Knetsch | Telefon +49 761 4588-2027 | h2fc.electrolysis@ise.fraunhofer.de

Durch den steigenden Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien im Stromnetz sowie die Nachfrage nach erneuerbar erzeugter Energie in Sektoren wie Industrie und Mobilität wächst der Bedarf nach einem Energieträger, der diese Sektoren miteinander koppeln kann. Wasserstoff kann diese Anforderungen zu einem großen Teil erfüllen. Daher stellt sich derzeit die Frage nach einer optimalen Konzeptionierung der Wasserstoffinfrastruktur in Deutschland. Damit ist auch die Auswahl von geeigneten Standorten für Wasserstoffanlagen verbunden.

Zusätzlich zu den bestehenden Arbeiten rund um die Konzeptionierung, Dimensionierung und techno-ökonomische Bewertung von Wasserstoffanlagen (Elektrolyseuren, Power-to-Gas-Anlagen, Wasserstofftankstellen) entwickelt das Fraunhofer ISE daher derzeit ein neues Tool zur Bewertung und Optimierung von Anlagenstandorten und Wasserstoffinfrastruktur. Ein weiterer Anwendungsfall ist die Analyse vorhandener Bus- und Bahnlinien auf ihre potenzielle Eignung für den Einsatz von emissionsfreien Antrieben.

Das Tool ermöglicht es z. B. mit Hilfe von GIS-basierten Analysen Bus- oder Bahnstrecken in einem bestimmten Gebiet – etwa einem regionalen Verkehrsverbund – zu identifizieren, die sich für den Einsatz von Brennstoffzellenantrieben eignen. Für die Bewertung der Strecken werden zuvor definierte Kennzahlen, z. B. die tägliche zurückgelegte Strecke, Steigungen oder die Anzahl der Haltestellen, herangezogen. Daraus ergibt sich schließlich die Eignung jeder einzelnen Strecke.

Auf diese Weise kann das technisch maximal erschließbare Potenzial einer ganzen Region ermittelt werden. Auf ähnliche Weise wird das Tool auch dazu verwendet werden, komplexe Wasserstoffversorgungspfade, etwa bestehend aus H<sub>2</sub>-Erzeugung-, -Transport- und -Verbrauchsanlagen, zu analysieren und zu optimieren.

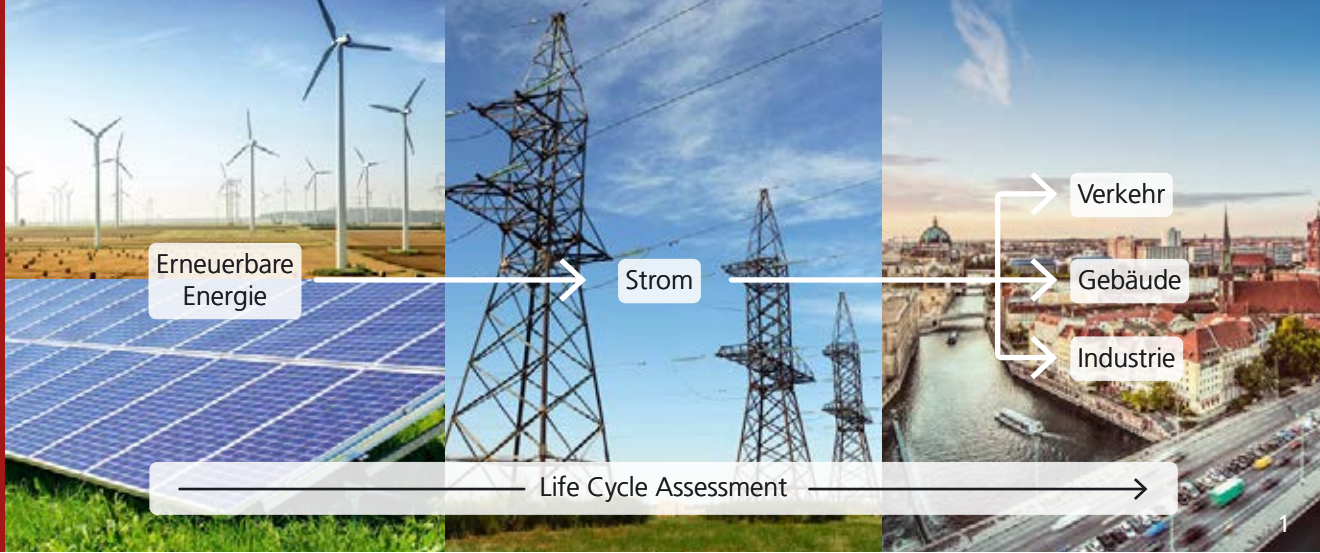
Mithilfe der am Fraunhofer ISE selbst entwickelten und seit 2012 erfolgreich eingesetzten Toolbox »H2ProSim« (Hydrogen Process Simulation Toolbox) kann die technische Potenzialanalyse um eine ökonomische Bewertung ergänzt werden, woraus letztlich eine kosteneffiziente Gesamtlösung abgeleitet wird. Dazu können unterschiedliche Szenarien simulativ techno-ökonomisch analysiert werden. Der Aufbau jedes Szenarios kann dabei individuell auf die Bedürfnisse des Kunden und des spezifischen Projekts angepasst werden. Eine mögliche spätere Investitionsentscheidung wird mithilfe einer solchen techno-ökonomischen Analyse optimal vorbereitet.

Das Fraunhofer ISE verfügt damit über die Möglichkeit, Industriekunden bei der Auslegung und der Standortwahl für Elektrolyseanlagen zur unterstützen und neue Anwendungsfelder zu erschließen. Im vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg geförderten Projekt »FrHyBus« setzt das Fraunhofer ISE das Tool derzeit ein und analysiert dort gemeinsam mit den assoziierten Partnern Stadt Freiburg, Südbadenbus und der Freiburger Verkehrs-AG das Potenzial von Wasserstoff-Brennstoffzellenbussen im ÖPNV im Großraum Freiburg.

1 Wasserstoff-Brennstoffzellenbus des belgischen Herstellers van Hool in Köln.

2 Analyse der Busstrecken des Öffentlichen Personennahverkehrs im Großraum Freiburg.





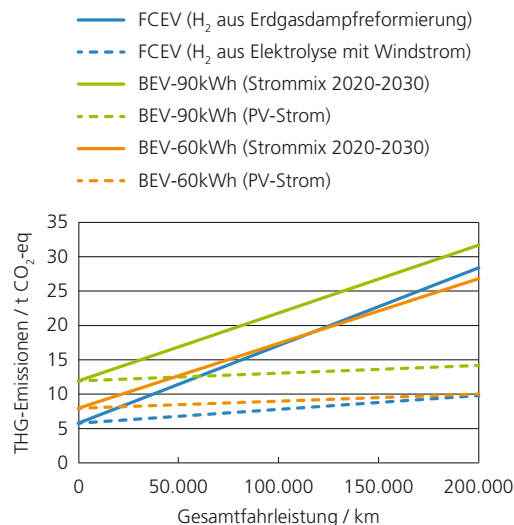
## Life Cycle Assessment von Prozessen zur Sektorenkopplung

André Sternberg | Telefon +49 761 4588-5131 | h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de

Zum Erreichen der Klimaziele ist der Einsatz von erneuerbaren Energien in allen Sektoren (Strom, Gebäude, Verkehr und Landwirtschaft) notwendig. Bislang ist die Integration von erneuerbaren Energien im Stromsektor am weitesten fortgeschritten. Daher wird auch für die Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie zurzeit die Nutzung von Strom aus erneuerbaren Energien diskutiert (Power-to-X). Einige Anwendungen, wie z. B. Elektrofahrzeuge oder Wärmepumpen, können direkt Strom nutzen. Andere Anwendungen, wie in der chemischen Industrie, erfordern strombasierte Energieträger zur Substitution von fossilen Rohstoffen. Für strombasierte Energieträger wird zunächst Wasserstoff in einer Elektrolyse erzeugt. Der Wasserstoff kann direkt als Energieträger eingesetzt werden oder er wird zusammen z. B. mit Kohlendioxid zu synthetischen Chemikalien, Kraftstoffen und Energieträgern wie Methanol, Dimethylether (DME) und Oxymethylenether (OME) umgewandelt.

Zurzeit werden zahlreiche synthetische Energieträger mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen diskutiert. Daher analysiert das Fraunhofer ISE diese synthetischen Energieträger aus einer ganzheitlichen Perspektive. Auf Basis der Methode des Life Cycle Assessments (LCA) werden die Energieträger ökologisch für verschiedenste Szenarien bewertet. Zudem erfolgt eine ökonomische Bewertung der unterschiedlichen Produktionsvarianten. Bei der ganzheitlichen Bewertung profitiert das Fraunhofer ISE von seinen zahlreichen Aktivitäten entlang der gesamten Prozesskette der synthetischen Energieträger (z. B. Photovoltaik, Elektrolyse, chemische Synthese in Miniplants und Energiesystemmodell REMod).

Neben der Herstellung der synthetischen Energieträger wird am Fraunhofer ISE auch deren Nutzung analysiert. In einer LCA-Kurzstudie für H2 Mobility Deutschland GmbH & Co. KG wurde die Nutzung von Wasserstoff in einem Brennstoffzellenfahrzeug hinsichtlich der Treibhausgasemissionen mit einem Batteriefahrzeug verglichen. Der Fokus der Studie lag auf großen PKWs (SUV) mit einer Reichweite von über 300 km. Die Ergebnisse zeigen, dass ein Brennstoffzellenfahrzeug das Potenzial hat, die Treibhausgasemissionen gegenüber einem Batteriefahrzeug mit einer großen Batterie (> 60 kWh) zu reduzieren. Das Brennstoffzellenfahrzeug profitiert dabei von den geringeren Treibhausgasemissionen während der Herstellungsphase. Batteriefahrzeuge mit einer kleineren Batteriekapazität weisen hingegen Vorteile bei den Treibhausgasemissionen auf. In weiteren Untersuchungen sollen zusätzliche Aspekte wie z. B. Second Life betrachtet werden.



<sup>1</sup> Die Idee von Power-to-X: Erzeugung von Strom aus erneuerbaren Energien und Nutzung des erneuerbaren Stroms in den Sektoren Verkehr, Gebäude und Industrie.

Grфик: Treibhausgasemissionen in Abhängigkeit der Fahrleistung für Brennstoffzellenfahrzeug (FCEV) und Batteriefahrzeuge (BEV) mit 60 kWh und 90 kWh Batteriekapazität.





## Versorgung von Inseln durch intelligentes Speicherdesign

Johannes Wüllner | Telefon +49 761 4588-2129  
batteries.application@ise.fraunhofer.de

Die Kosten der Stromversorgung in netzfernen Gebieten oder geografischen Inseln können gegenüber dem öffentlichen Netz um ein Vielfaches höher sein. In dieselbasierten Anlagen ist vor allem der Treibstofftransport ein Kostenfaktor, bei der Netzanbindung einer Insel die teuren Seekabel.

Daher ist die Integration von immer kostengünstigeren erneuerbaren Energiequellen bereits seit Jahren technisch und wirtschaftlich sinnvoll. Mit wachsendem Anteil fluktuierender Energiequellen werden aber intelligente und schnelle Regelungssysteme sowie die Integration stationärer Speichersysteme unerlässlich, damit die Stromversorgung die Nachfragekurve stets erfüllen kann und die Systemstabilität gewährleistet ist.

Diese zentralen Themen stehen im Fokus des Horizon2020-Projekts »REACT«, in dem das Fraunhofer ISE eine führende Rolle bei der Überarbeitung der Versorgungsstrategien von acht europäischen geografischen Inseln, der Planung der erforderlichen Speicherkapazitäten sowie der Entwicklung und Umsetzung optimierter Strategien zur Steuerung der Batteriespeicher spielt. Ziel ist es, die solare Deckungsrate zu maximieren und damit die Versorgungskosten und die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu minimieren.

Die Implementierung einer zentralen IKT-Plattform, die auf selbst entwickelten Open-Source Energiemanagementsystemen basiert, wird neue Geschäftsmodelle ermöglichen, bei denen sowohl Kunden als auch Netzbetreiber die Nutzung der installierten Speicher- und anderen Flexibilitätsoptionen weiter optimieren können.

1 *Blick auf La Graciosa von Lanzarote, Kanarische Inseln (Spanien).*

## Solar gestützte Trocknungs- und Kühltechnologie

Dipl.-Ing. (FH) Norbert Pfanner | Telefon +49 761 4588-5224  
batteries.application@ise.fraunhofer.de

In vielen Entwicklungsländern stellt sich die Frage, wie Nachernte-Verluste durch bessere Kühlung und Trocknung der Lebensmittel vermieden werden können. Hierbei wird für Regionen ohne Netzanschluss oft auf autarke Stromversorgung zurückgegriffen, bei der Photovoltaikanlagen mit geeigneten Speichertechnologien kombiniert werden. Das Fraunhofer ISE forscht daran, eine vollständige und sichere Energieversorgung dieser Anwendungen durch Solarenergie zu gewährleisten.

In Kenia z.B. führen wir derzeit in Kooperation mit einem deutschen Unternehmen, zwei kenianischen Forschungs-Institutionen (KIRDI, KMFRI) und einer kenianischen Universität (TUM) ein Projekt für Fischer durch. In Kenia schrumpfen die natürlichen Fischbestände, sodass die lokalen Fischer auf schwankende saisonale Bestände angewiesen sind. Der Mangel an geeigneten Verarbeitungstechnologien (Lagerung, Trocknung) zwingt die Fischer ihre Erzeugnisse sehr schnell und nur regional zu verkaufen – oft zu unwirtschaftlichen Preisen.

Vor diesem Hintergrund entwickelt das Fraunhofer ISE in einem interdisziplinären Projekt ein Technologiepaket für Verarbeitungsprozesse, die mit erneuerbaren Energien versorgt werden, inklusive Kühlung und Trocknung von Fischen. Für die Kühlung der Ware werden Eis-Flakes eingesetzt, produziert durch eine solarelektrisch versorgte Eismaschine. Die Dehydrierung von Fischen basiert auf einer solarthermischen Trocknungsanlage. Derartige Projekte des Fraunhofer ISE werden zudem von Schulungs- und Qualifizierungsmaßnahmen vor Ort flankiert.

2 *Landestypische Fischerboote am Lake Victoria, Kenia.*



## Lithium-Festkörper-Batterien mit Ionenleiter auf Sulfid-Basis

Dr. Andreas Georg | Telefon +49 761 4588-5993  
batteries.cell@ise.fraunhofer.de

Eine Steigerung der Energiedichte und Sicherheit von Lithium-Batterien ist für eine erfolgreiche Verkehrswende von zentraler Bedeutung. Batterien mit festen, unbrennbaren Elektrolyten (sog. »all solid state batteries«) können hierzu einen entscheidenden Beitrag leisten. Die Energiedichte lässt sich dabei besonders durch den Einsatz von metallischem Lithium an der negativen Elektrode steigern. Der Festelektrolyt unterdrückt dabei die gefürchtete Dendritenbildung, die beim Einsatz von flüssigen Elektrolyten zum Versagen der Zelle führt.

Sulfidische Ionenleiter weisen hohe Leitfähigkeiten und Duktilitäten auf und können bei vergleichsweise niedrigen Temperaturen prozessiert werden. Daher sind sie auch für Druckprozesse geeignet. Derzeit werden am Fraunhofer ISE Druckpasten und Druckprozesse für die Herstellung von Lithium-Batterien entwickelt und damit Batteriezellen hergestellt und charakterisiert.

Ein aktuelles Thema ist die Untersuchung des Einflusses von Bindern und Dispersionsmitteln auf die Leitfähigkeit des Ionenleiters und die Leistungsfähigkeit der gesamten Batteriezelle. Dabei stellen wir Vergleiche zu aus Pulvern verpressten Batteriezellen an und legen ein besonderes Augenmerk auf die Grenzflächen zwischen den einzelnen Komponenten, d. h. den elektrochemisch aktiven Materialien und dem sulfidischen Ionenleiter. Diese Grenzflächen optimieren wir weiter durch gezielte Beschichtungen im Nanobereich.

1 *Glovebox für die Herstellung der Sulfid-basierten Feststoffbatterien.*

## Alterungsuntersuchungen an Lithium-Ionen-Batteriespeichern

Stephan Lux | Telefon +49 761 4588-5419  
batteries.system@ise.fraunhofer.de

Batteriespeicher kommen auch in stationären Anwendungen immer häufiger zum Einsatz. Sie werden heute oft aus Lithium-Ionen Zellen aufgebaut, wenn z. B. hohe Zyklenzahlen und hohe kalendarische Lebensdauern nötig sind. Die Investition in diese elektrischen Speicher amortisieren sich jedoch nur, wenn gewährleistet werden kann, dass sie in der Anwendung sicher und zuverlässig arbeiten sowie die zugesicherten Performance-Kennwerte und Lebensdauern erreicht werden.

Das Fraunhofer ISE führt in seinem Batterielabor umfangreiche Alterungsuntersuchungen an Batteriezellen sowie an kompletten Batteriespeichern durch. Wir sind dabei nicht auf bestimmte Anwendungen festgelegt und sind in der Lage, sowohl stationäre Speicher für Eigenheime, Gewerbe und Industrie als auch komplette Fahrzeugbatterien zu vermessen. Dabei werden die Betriebsparameter wie z. B. Temperatur, Strom und Entladetiefe variiert. Auf dieser Grundlage erstellen wir Alterungsmodelle für verschiedene Technologien, mit denen sich technische Fragestellungen der Lebensdauer in bestimmten Anwendungen sowie Lebensdauerkostenanalysen im Rahmen von Simulationsstudien bearbeiten lassen.

Die Modelle werden permanent weiterentwickelt und mit Messdaten aus unserem Batterielabor parametrisiert und validiert. Im Projekt »Safety First« und im laufenden Projekt »Rural-Li« werden z. B. umfangreiche Alterungstests durchlaufen. Diese bilden die Basis für die erfolgreiche Durchführung des gerade gestarteten Projekts »EMILAS«, das u. a. den Einsatz von second-use-Speichern in Ladestationen für die Elektromobilität adressiert.

2 *Durchführung von Lebensdaueruntersuchungen an PV-Heimspeichern im Batterielabor des Fraunhofer ISE.*

# LEISTUNGSELEKTRONIK, NETZE UND INTELLIGENTE SYSTEME



**167**

Mitarbeitende



**21**

Zeitschriften- und Buchbeiträge



**35**

Vorträge und Konferenzbeiträge



**2**

Neu erteilte Patente



Regelmäßige Infos zu den Meilensteinen unserer Forschung bieten unsere Newsletter!

Bild: Hybridkraftwerk bestehend aus PV-System, Speichereinheit (EBU) und Diesel-Genset (GPU).

Im Geschäftsfeld »Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme« befassen wir uns mit der Digitalisierung des elektrischen Energiesystems. Wir arbeiten daran, das Zusammenspiel zwischen der effizienten Gewinnung erneuerbarer Energien, der sicheren Versorgung der Verbraucher, der Energiespeicherung und dem stabilen Betrieb im künftigen Stromnetz zu optimieren. Darüber hinaus stellt die Systemanalyse für die Sektorenkopplung – mit dem Verkehrs-, Wärme- und Gebäudesektor – einen weiteren, wichtigen Schwerpunkt unserer Aktivitäten dar.

Die Leistungselektronik entwickelt sich zu einer Schlüsseltechnologie für die zukünftige Energieversorgung, da sie immer mehr Aufgaben zur Netzstabilisierung übernehmen muss. Durch den Einsatz neuester Bauteile, wie z. B. Halbleiter aus Siliciumkarbid oder Galliumnitrid, entwickeln wir deutlich kompaktere, effizientere und kostengünstigere Umrichtersysteme. Durch die wachsende Verbreitung von Photovoltaik, Wärmepumpen und Elektroautos gelangt das Stromnetz an vielen Stellen an die Grenze seiner Belastbarkeit. Dadurch treten zunehmend Engpässe sowie Instabilitäten auf, die wir durch Netzsimulation analysieren und für die wir Lösungen erarbeiten. Dazu gehört ganz wesentlich ein netzdienlicher Betrieb von Wandlern und Verbrauchern und die Einbindung von Speichern. Netzdienlicher Betrieb beruht sowohl auf der Einhaltung geforderter Richtlinien, sogenannter »Grid Codes«, als auch auf einer optimalen Integration der genannten Anlagen in den Energiemarkt.

Dafür spielt auch die Digitalisierung eine immer wichtigere Rolle. Neben der Simulation und Optimierung von Stromnetzen für eine höhere Aufnahmefähigkeit volatiler erneuerbarer Energien forschen wir auch an neuartigen Informations- und Kommunikationstechniken einschließlich der Nutzung von Methoden der künstlichen Intelligenz. Im Umfeld von Smart Grids ist unser Ziel, die Anlagen zu vernetzen und die Resilienz des Systems bei zugleich signifikanter Erhöhung des Anteils erneuerbarer Energien zu erhalten. Darüber hinaus entwickeln wir digitale Modelle zur ganzheitlichen Energiesystemanalyse. Diese liefern techno-ökonomisch optimierte Transformationspfade zur sektorenübergreifenden Energiewende und haben sowohl in Smart Cities als auch im regionalen, transnationalen und politischen Kontext eine große Bedeutung.

## Meilensteine 2019

- » [Fraunhofer ISE »Energy-Charts« um neue Funktionalitäten und Diagramme erweitert](#)
- » [Einweihung neuer Standort des Zentrums für Leistungselektronik und nachhaltige Netze](#)
- » [Multi-Megawatt-Solarwechselrichter mit neuen Funktionalitäten fürs Netzmanagement getestet](#)
- » [15-kV-Bahnwechselrichter](#)
- » [Neue, auf »REMod« basierende Studie »Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen« veröffentlicht](#)





[www.ise.fraunhofer.de/leistungselektronik-netze-und-intelligente-systeme](http://www.ise.fraunhofer.de/leistungselektronik-netze-und-intelligente-systeme)

## Ansprechpartner

### Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme

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

### Neue Bauelemente und Technologien

Prof. Dr. Bruno Burger | Telefon +49 761 4588-5237  
[energysystem.components@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem.components@ise.fraunhofer.de)

### Umrichtersysteme

Stephan Liese | Telefon +49 761 4588-5890  
[energysystem.converters@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem.converters@ise.fraunhofer.de)

### Wechselrichter in Netzen

Sönke Rogalla | Telefon +49 761 4588-5454  
[energysystem.power@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem.power@ise.fraunhofer.de)

### Intelligente Netze


Dr. Robert Kohrs | Telefon +49 761 4588-5708  
[energysystem.grids@ise.fraunhofer.de](mailto:energysystem.grids@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 2019


 [LUIZ](#) – Leistungselektronik – Intelligent und Zuverlässig


 [InteResSE](#) – Ressourcenbedarf für die Energiewende:  
Interdisziplinäre Bewertung von Szenarien für die  
Bereitstellung von Strom und Wärme


 [OVRTuere](#) – Zeitweilige Überspannungen und abgeleitete  
Regeln für einen effizienten und sicheren Netzbetrieb


 [WARO](#) – WeatherAggReOpt

 [GeoSmart](#) – Technologies for Geothermal Power Plants  
to Enhance Competitiveness Through Smart and Flexible  
Operation

 [EnStadt:Pfaff](#) – Innovative Photovoltaik-DC-Lade-  
infrastruktur mit Pufferspeicher

 [Q-Integral](#) – Aktives Blindleistungsmanagement mit  
dynamischen Blindleistungsquellen an der Schnittstelle  
Verteilungsnetz und Übertragungsnetz

 [REACT](#) – Renewable Energy for Self-Sustainable  
Island Communities

 [IEK](#) – Entwicklung eines Integrierten Energiekonzepts  
2050

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





## Impedanzspektroskopie von Wechselrichtern

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

Oberschwingungsbelastungen können den stabilen Betrieb von PV- und Windparks gefährden. Häufig handelt es sich dabei um eine resonanzbasierte Wechselwirkung zwischen Wechselrichtern und dem Netz, die mit den etablierten Verfahren zur Oberschwingungsbewertung von Wechselrichtern nicht erfasst werden können.

Mit der sogenannten Impedanzspektroskopie von Wechselrichtern hat das Fraunhofer ISE ein neues Charakterisierungsverfahren entwickelt, mit dem sowohl die inneren Oberschwingungsquellen eines Wechselrichters als auch dessen wirksame Ausgangsimpedanz messtechnisch bestimmt werden können. Dazu wird der Wechselrichterprüfling in einem Frequenzbereich von bis zu 20 kHz mit einer variablen Kleinsignalspannung angeregt. Durch Analyse der gemessenen Stromreaktion kann anschließend der Wechselrichter frequenzselektiv als Spannungsquelle mit Innenimpedanz (sog. Thévenin-Äquivalent) beschrieben werden.

Mit dem Ergebnis der Impedanzspektroskopie lässt sich durch den Vergleich des ermittelten Impedanzverlaufs eines Wechselrichters und eines gegebenen Netzanschlusspunkts die Resonanzneigung von PV- oder Windparks analysieren. Zur Sicherstellung einer hohen Spannungsqualität bei einer steigenden Durchdringung der Stromnetze mit Wechselrichtern steht damit ein neues hilfreiches Analyseverfahren zur Verfügung.

1 Prüfstand zur Durchführung von Impedanzspektroskopien an Wechselrichtern bis zu 1 Megawatt.

## Ladesysteme für die Elektromobilität von morgen

Dr. Robert Kohrs | Telefon +49 761 4588-5708  
energysystem.grids@ise.fraunhofer.de

Bei der Integration von Elektrofahrzeugen als intelligente Verbraucher und Speicher im Stromnetz sind eine hohe Verfügbarkeit sowie eine netzstützende Betriebsweise von großer Bedeutung. Im Projekt »BiLawE« z. B. wurde ein bidirektionales induktives Ladesystem entwickelt und dessen wirtschaftliche Einbindung in das Stromnetz untersucht und entsprechende Geschäftsmodelle erarbeitet. Die Einbettung von induktiven Ladeinfrastrukturen in verschiedene Anwendungsszenarien wie u. a. öffentliche Parkzonen, Firmenparkplätze oder Smart Homes erlaubt müheloses Laden ohne Kabel, das Fahrzeug wird so auch bei voller Batterie öfter und länger im Stromnetz verfügbar.

Das Fraunhofer ISE entwickelt darüber hinaus hochkompakte und hocheffiziente Umrichter, die in der Lage sind, Regelleistung, Blindleistung, sowie weitere Systemdienstleistungen in beide Richtungen bereitzustellen. Eine besondere Herausforderung sind geringe Netzurückwirkungen (THDi), sowie die Möglichkeit gezielt Oberschwingungsströme von nichtlinearen Verbrauchern im Netz zu kompensieren und somit die Spannungsqualität am Netzverknüpfungspunkt zu verbessern.

Wir entwickeln zudem das Lademanagement, das drahtlos zwischen Fahrzeug und Infrastruktur vermittelt und den Ladevorgang innerhalb des lokalen Energiesystems des Gebäudes oder Netzabschnitts optimiert. Für die Kommunikation wenden wir den internationalen Standard ISO 15118 an, den wir für die drahtlose Energieübertragung und die Rückspeisung erweitert haben.

2 Ladesäule am Fraunhofer ISE.



## Ressourcenbewertung für die Energiewende

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

Der Übergang von einem fossilen zu einem erneuerbaren Energiesystem erfordert den Einsatz einer Vielzahl von Rohstoffen, die für die Herstellung und Wartung der eingesetzten Energietechnologien benötigt werden. Das Fraunhofer ISE untersucht die Nachfrage an diesen Rohstoffen und identifiziert etwaige Versorgungsrisiken, um Strategien zur Vermeidung von Ressourcenengpässen zu entwickeln.

Nicht nur auf globaler und nationaler Ebene, sondern auch für Unternehmen analysiert das Fraunhofer ISE die Kritikalität von Materialien. Für Industrieprozesse oder Technologien wie PV-Module, Batterien, Wasserstofftechnologien und Leistungselektronik wird der Rohstoffbedarf identifiziert und auf Kritikalität untersucht. Dabei betrachten wir Rohstoffeigenschaften wie Versorgungsrisiken und Umweltauswirkungen anhand von Ökobilanz, Recyclingpotenzial, Preisen sowie Gesellschaftsfaktoren und prognostizieren deren Entwicklung.

Unsere Studien können sowohl für strategische Unternehmensentscheidungen genutzt werden, als auch die Entwicklung eines Produkts begleiten. So betrachten wir auch die Funktionalität der einzelnen Rohstoffe im Produkt und identifizieren die ressourcenstrategisch optimalen Designs. Diese validieren wir anhand einer iterativen Ökobilanzierung und Kritikalitätsanalyse. So werden z. B. während der Entwicklung von PV-Wechselrichtern Konzeptentwürfe kontinuierlich auf kritische Ressourcen und ökologische Fragestellungen hin untersucht, um hinsichtlich Wirkungsgrad, Zuverlässigkeit, Kosten und eingesetzter Rohstoffe ein optimales Endprodukt zu erhalten.

1 In Energietechnologien werden unterschiedliche, auch kritische oder sogar toxische Metalle eingesetzt.

## Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem

Dr. Christoph Kost | Telefon +49 761 4588-5750  
 energysystem.analysis@ise.fraunhofer.de

Die Gestaltung eines nachhaltigen Energiesystems in Deutschland bedarf einer sorgfältigen Planung. Wichtig ist unter anderem, die Herausforderungen und Synergien zu berücksichtigen, die durch die Kopplung der Sektoren Strom, Wärme, Industrie und Verkehr auftreten. Um diese Transformation unter Einhaltung der Klimaschutzziele der Bundesregierung so kostengünstig wie möglich zu gestalten, hat das Fraunhofer ISE das Energiesystemmodell »REMod« entwickelt. Hiermit können die Kopplungseffekte analysiert werden, die durch eine gleichzeitige Optimierung aller relevanten Sektoren und Technologien des Energiesystems entstehen und Handlungsempfehlungen abgeleitet werden.

In der aktuellen, auf REMod basierenden Studie »Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen« entwickelt das Fraunhofer ISE unterschiedliche in sich konsistente Szenarien für den Umbau des Energiesystems. Diese Szenarien werden unter Berücksichtigung verschiedenster Weiterentwicklungen des Modells seit der Vorgängerstudie »Was kostet die Energiewende?« analysiert und Handlungsempfehlungen abgeleitet. Dabei wird im Vergleich zu bisherigen Studien eine vergleichsweise hohe Reduktion der energiebedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen von 95 % bzw. 100 % betrachtet.

Im Fokus der Auswertung steht zum einen die Rolle der Photovoltaik für das Energiesystem. Zum anderen untersuchen wir für ausgewählte Schlüsseltechnologien, welcher Zubau zur Einhaltung der Klimaschutzziele in den Jahren 2030 und 2050 erforderlich ist.

2 Die Studie »Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem« wurde im Februar 2020 vorgestellt.



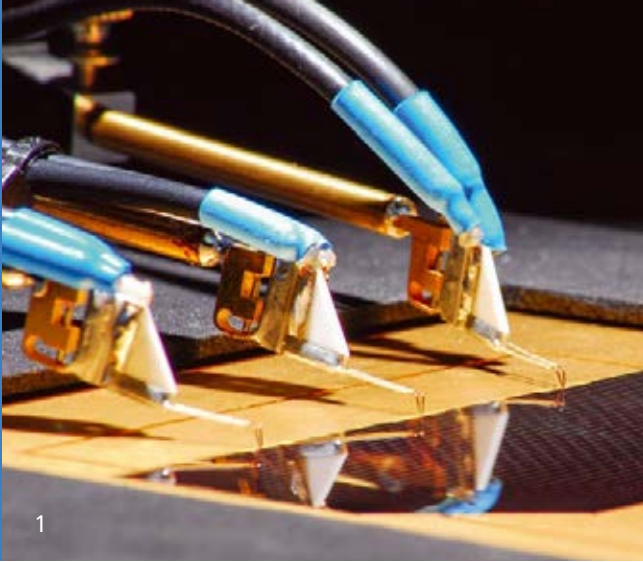


# AKKREDITIERTE LABORS

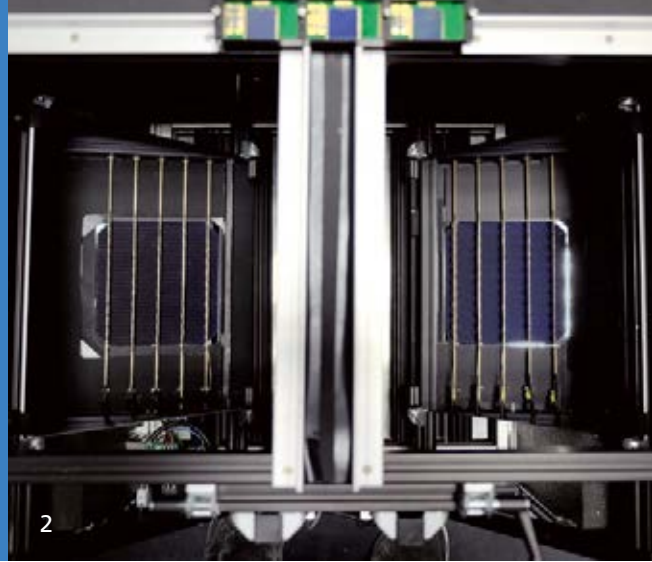
Das Fraunhofer ISE bietet in Ergänzung zu seinen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten Unternehmen und Forschungseinrichtungen auch verschiedene Prüf- und Zertifizierungsleistungen an. Derzeit verfügt das Institut über zwei Kalibrier- und fünf Testeinrichtungen mit modernster technischer Ausstattung und Akkreditierung durch die Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS:

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

*Bild: Programmierung von PV-Simulatoren für Wechselrichtertests im TestLab Power Electronics.*



1



2

## Kalibrierung von Solarzellen

cells@Callab.de

Das Callab PV Cells des Fraunhofer ISE bietet die Kalibrierung und Messung von Solarzellen verschiedenster PV-Technologien an und arbeitet national sowie international mit Unternehmen und Instituten an der Entwicklung von Methoden zur präzisen Messungen von neuen Solarzellentechnologien. 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 Photovoltaik-Herstellern und mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) arbeiten wir an der kontinuierlichen Verbesserung der Messunsicherheiten und der Entwicklung neuer Messverfahren.

Bifaziale Solarzellen können bei uns sowohl mit beidseitiger als auch mit einseitiger Beleuchtung präzise vermessen werden. Die Weiterentwicklung unserer vorhandenen Messplätze ermöglicht uns noch höhere Präzision und kürzere Messzeiten, sodass wir die Dienstleistungen für unsere Kunden weiter verbessern konnten. Dabei spielen neu entwickelte und verbesserte Optiken zur Homogenisierung eine wesentliche Rolle. Derartige Weiterentwicklungen sollen in naher Zukunft auch die Messung großflächiger Mehrfachsolarzellen ermöglichen. Mit verschiedenen Mehrlichtquellensimulatoren können wir Messungen von Mehrfachsolarzellen unter nahezu beliebigen Normbedingungen – z. B. für Weltraum- und für Konzentratoranwendungen – durchführen. In einem neuen Arbeitsgebiet beschäftigen wir uns mit der Vermessung von Laserleistungssolarzellen und dabei im Besonderen mit Zellen, die aus identischen monolithischen Zellstapeln von bis zu 12 pn-Übergängen bestehen.

Zusätzlich unterstützen wir die Normentwicklung der Arbeitsgruppen WG2 und WG7 des technischen Komitees TC82 der IEC im Bereich der konzentrierenden und nicht-konzentrierenden Photovoltaik.

Callab  
PV Cells



*Silicium-, Dünnschicht-, Perowskit-, organische Solarzellen*

Dr. Jochen Hohl-Ebinger

Telefon +49 761 4588-5359

Wendy Schneider

Telefon +49 761 4588-5146

*Mehrfach- und Konzentratorzellen*

Dr. Gerald Siefer

Telefon +49 761 4588-5433

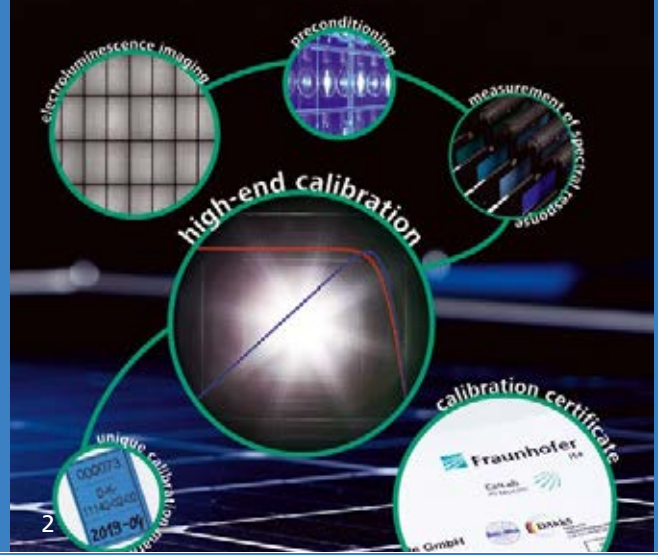
### Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung als Kalibrierlabor nach DIN EN ISO/IEC 17025
- » Solarzellenkalibrierung folgend IEC 60891 und den Normen der Serie IEC 60904 unter diversen Referenzbedingungen wie:
  - » AM1.5g (IEC 60904-3)
  - » AM0 (ISO 15387)
  - » AM1.5d (ASTM G173-03)

1 Kontaktierung bei der Kalibrierung einer unmontierten 4" Weltraum-Mehrfachsolarzelle.

2 Aufbau zur Messung bifazialer Solarzellen mit sowohl einseitiger als auch beidseitiger Beleuchtung.





## Kalibrierung und Performance-Tests von PV-Modulen

modules@CalLab.de

**CalLab**  
PV Modules



Die präzise Kalibrierung von PV-Modulen für Produktionslinien weltweit wird von unserem akkreditierten Kalibrierlabor CalLab PV Modules schnell und zuverlässig durchgeführt. Mit nur 1,1 % Messunsicherheit werden die Referenzprodukte für Modulhersteller kalibriert und bilden damit das Bezugsnormal für Produktionsmengen im GW-Maßstab. Unsere Kalibrierscheine und Kalibriermarken auf den Modulen stehen für höchste Präzision und Qualität.

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

Hocheffiziente Zelltechnologien wie PERC, TOPCon und HJT halten aktuell Einzug bei fast allen Modulherstellern, ebenso bifaziale Technologien. Die kontinuierliche Entwicklung neuer Messmethoden und angepasster Messsysteme in unserem Kalibrierlabor stellt sicher, dass wir für diese PV-Module präzise Leistungsmessungen anbieten können.

Mit unseren genauen Performance-Tests gemäß IEC 61853 ermitteln wir die Leistung der Module für relevante Betriebsbedingungen mit kleinsten Messunsicherheiten. Durch Optimierung des Sonnensimulators für Power-Rating-Messungen haben wir die Genauigkeit besonders bei Schwachlicht weiter verbessert. Damit kann die Unsicherheit bei der Ertragssimulation deutlich reduziert werden. Für Investoren von PV-Kraftwerken ergibt sich dadurch mehr Sicherheit. Basierend auf unseren präzisen Performance-Tests im Kalibrierlabor können wir Ertragssimulationen für Module nach IEC 61853 durchführen. Unterschiedliche Modultypen können so für definierte Standorte sehr genau verglichen werden.

### Standards und Spezifikationen

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

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

- 1 *Inspektion eines PV-Moduls vor der Kalibrierung.*
- 2 *Ablauf einer Kalibrierung im CalLab PV Modules.*





## Qualitätssicherung von PV-Modulen

tlpv@ise.fraunhofer.de

**TestLab**  
PV Modules



Das TestLab PV Modules prüft die Qualität und Zuverlässigkeit von PV-Modulen. In unserem akkreditierten Labor betreiben wir modernste und innovative Prüfanlagen, deren Anwendungsspektrum deutlich über die Standardprüfungen hinausgeht.

Wir beraten unsere Kunden zu kosten- und zeiteffizienten Prüfprogrammen und individuellen Qualitätskriterien. Im TestLab PV Modules erkennen wir potenzielle Schwachstellen von Modulen, vergleichen verschiedene Modultypen im Benchmarking und qualifizieren spezielle Modultechnologien für besondere Einsatzbedingungen.

Um die technologischen Besonderheiten von neuen Technologien (z.B. bifaziale Module) zu berücksichtigen, beteiligen wir uns an der Weiterentwicklung von Prüfnormen. Mithilfe innovativer und modernster Analysemethoden untersuchen wir systematisch Fehlerbilder wie Schneckenspuren, Potenzialinduzierte Degradation (PID) und Light and elevated Temperature Induced Degradation (LeTID). Mit zielgerichteten Prüfungen und Prüfsequenzen beurteilen wir viele typische Fehlerbilder. Die modernen Prüfanlagen im TestLab PV Modules liefern genaueste Messwerte.

Die hochgenauen Leistungsmessungen führen wir in unserem akkreditierten Kalibrierlabor Callab PV Modules durch. Das Labor arbeitet mit einer weltweit führenden, akkreditierten Messunsicherheit von nur 1,1 %. In Kooperation mit dem VDE Prüf- und Zertifizierungsinstitut prüfen wir PV-Module für die Zertifizierung nach internationalen Qualitäts- und Sicherheitsstandards. Um laufend eine unabhängige Qualitätssicherung der Modulproduktion auf hohem Niveau zu ermöglichen, haben wir das Qualitätszertifikat »VDE Quality Tested« entwickelt.

Für besondere klimatische Herausforderungen in Wüsten oder an tropischen Standorten bieten wir modellbasierte Langzeitstabilitätstests, um PV-Module und Komponenten auch in diesen Gebieten zuverlässig einsetzen zu können.

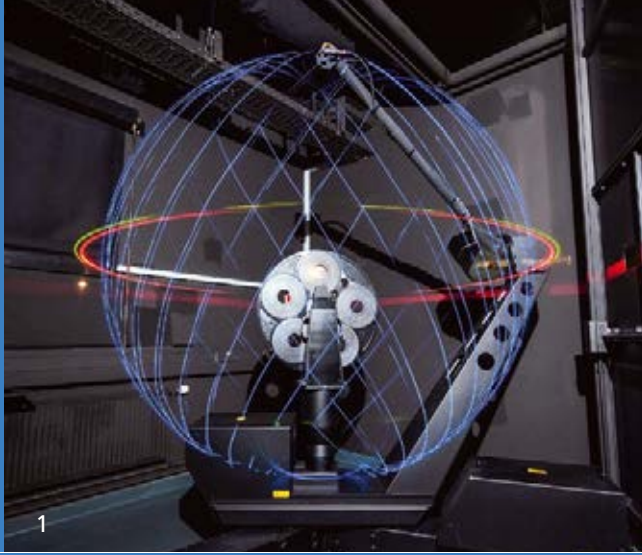
Dipl.-Ing. (FH) Daniel Philipp  
Telefon +49 761 4588-5414

### Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025 für folgende PV-Modul-Standards:
  - » IEC 61215-1/-2:2016  
Bauartegnung und -zulassung
  - » IEC 61730-1/-2:2016  
Sicherheitsqualifikation
  - » UL 1703/UL 61730/UL 61215
  - » IEC 61701:2011 Salznebeltest
  - » IEC TS 62804-1:2015 Testmethode für PID
- » Darüber hinaus bieten wir:
  - » Sandabrationstests
  - » Untersuchung der Light and elevated Temperature Induced Degradation (LID/LeTID)
  - » Material- und Komponentenqualifizierung
  - » Schadens- und Fehleranalyse

1 *Präzise und reproduzierbare mechanische Belastungsprüfung, hier am Beispiel eines Glas-Glas-Moduls.*

2 *Freiland-Teststand zur Bestimmung der nominalen Betriebstemperatur von PV-Modulen (NMOT).*



## Charakterisierung von Fassaden und Bauteilen

testlab-solarfacades@ise-fraunhofer.de

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 Prüfmethode oft nur unzureichend charakterisiert werden können, wie Bauteile mit winkel- und polarisationsabhängigem Verhalten, lichtstreuenden Materialien oder strukturierten und lichtlenkenden Elementen. Die Dienstleistungen des TestLab Solar Façades werden auch für Fragestellungen 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.

**TestLab**  
Solar Façades



Dr. Christoph Maurer  
Telefon +49 761 4588-5667  
Mobil +49 172 1613886

### Standards und Spezifikationen

- » Akkreditierung nach DIN EN ISO/IEC 17025
- » Transmission, Reflexion und g-Wert nach DIN EN 410, ISO 9050, DIN EN ISO 52022, 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

1 Photogoniometer für winkelabhängige optische Messungen.

2 Outdoor Test Facility for Real-size Building Envelope Elements (OFREE).



## Prüfung von Kollektoren, Speichern und Systemen

testlab-sts@ise.fraunhofer.de

Integrale Systemlösung mit möglichst hohem Anteil erneuerbarer Energien sind für die CO<sub>2</sub>-Reduzierung essenziell. Um Technologien auch unter diesem Aspekt bewertbar zu machen, sind entsprechende technische Kennzahlen erforderlich, die das Fraunhofer ISE seinen Kunden zur Verfügung stellt.

Im Leistungsangebot des TestLab Solar Thermal Systems sind sämtliche Bauarten von Sonnenkollektoren, Wärmespeichern sowie Komplettsysteme zur Heizungs- und Warmwasserbereitstellung abgedeckt.

Die Marktzulassung von PVT-Kollektoren stellt häufig noch eine Herausforderung dar. Für diese hybriden Kollektoren bieten wir zusammen mit unserem ebenfalls akkreditierten TestLab PV Modules eine komplette Zertifizierungsmessung (IEC und ISO) an. Auch ganze Heizsysteme lassen sich in unseren Labors untersuchen, z. B. die Kombination von solaren Lösungen mit Wärmepumpen, für die wir mit dem akkreditierten TestLab Heat Pumps and Chillers zusammenarbeiten.

In den Labors werden auch die notwendigen Kennzahlen zur Bewertung der Produkte (z. B. Wärmespeicher) nach dem Energy Label (ErP) der EU ermittelt. Nicht zuletzt verfügen wir über den weltweit einzigen voll akkreditierten Teststand für Solarluftkollektoren. Neben vielen Funktionsprüfungen wie Hagelschlagfestigkeit oder Regendichtigkeit prüfen wir auch die mechanische Widerstandsfähigkeit (bei -40 °C bis +90 °C) von Montagesystemen, PV-Modulen und Solarthermie-Kollektoren individuell und zusätzlich zu den normativen Testbedingungen nach Kundenbedarf.

Unser Indoor-Teststand mit Solarsimulator liefert eine hohe Wiederholgenauigkeit, was besonders auch im Entwicklungskontext von Bedeutung ist. Mit der Weiterentwicklung von in situ Charakterisierung ergeben sich im TestLab Solar Thermal Systems für unsere Kunden auch Möglichkeiten, die Anlagen im Feld zu vermessen, z. B. Nahwärmenetze. Im Rahmen des Zertifikats Solar Keymark führen wir Werksinspektionen bei unsere Kunden weltweit durch.

**TestLab**  
Solar Thermal  
Systems



### *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 *Produktionslinie für druckbeaufschlagte Warmwasserspeicher.*
- 2 *Solarthermiefeld zur Energieversorgung eines Nahwärmenetzes.*





## Vermessung und Prüfung von Wärmepumpen

testlab\_heatpumps@ise-fraunhofer.de

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 thermisch 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, durch die sich Entwicklungs- und Optimierungsprozesse von Geräten und komplexeren Systemen durch realitätsnahe, dynamische Prüf-abläufe, inkl. »Hardware-in-the-Loop«, zeit- und kosteneffizienter 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).

## TestLab

Heat Pumps  
and Chillers



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
- » Das TestLab ist für die Durchführung von Heat-Pump-Keymark-Prüfungen anerkannt
- » Prüfungen für die Passivhaus-Institut-Zertifizierung (PHI)
- » Nach der F-Gas-Verordnung, Klasse I, zertifizierte Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

<sup>1</sup> Untersuchung der Leckagevorgänge an einem Propan-Kältekreis.



## Charakterisierung leistungselektronischer Geräte

testlab-pe@ise.fraunhofer.de

**TestLab**  
Power Electronics



Das akkreditierte TestLab Power Electronics bietet die Prüfung von elektrischen Einheiten und Anlagen im hohen Leistungsbereich bis ca. 10 Megawatt an. Es kann dabei auf die umfangreiche Ausstattung des »Zentrums für Leistungselektronik und nachhaltige Netze« am neuen Standort Zinkmattenstraße zurückgreifen (Seite 74).

Die Ausstattung des Labors ermöglicht die Prüfung von Umrichtersystemen hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften, die Charakterisierung nach heutigen Netzanschlussrichtlinien sowie die Durchführung von kundenspezifischen Klimatests. Wir prüfen vor allem PV- und Batterie-Wechselrichter aber auch Verbrennungskraftmaschinen wie BHKWs sowie Lasten wie z. B. Schnellladesysteme für die Elektromobilität. Am neuen Standort stehen u. a. verschiedene Transformatoren für den Anschluss von Prüflingen sowie Testeinrichtungen zur Prüfung des dynamischen Netzverhaltens (UVRT und OVRT) zur Verfügung. Zudem können wir mit einer Schwingkreistesteinrichtung das Verhalten von Erzeugungseinheiten bis zu einer Leistung von 400 kVA während ungewollten Inselnetzbildungen untersuchen.

Darüber hinaus bieten wir unseren Kunden Vermessungen im Feld, etwa in großen PV-Kraftwerken oder Windparks, an. Hierfür stehen sechs Leistungsmesssysteme mit je 16 Messkanälen zur Verfügung, die räumlich verteilt angeordnet und synchronisiert werden können. Mit unserem 4,5-MVA-LVRT-Testcontainer können wir auch größere Erzeugungseinheiten direkt vor Ort prüfen. In unserem Outdoor-Testfeld nutzen wir u. a. für Wechselrichtertests einen variabel konfigurierbaren PV-Generator mit einer Leistung von 1 MWp.

Wir prüfen Erzeugungseinheiten nach internationalen Einspeiserichtlinien (z. B. für Deutschland, China, Großbritannien) und bestimmen hochgenau den Wirkungsgrad leistungselektronischer Geräte. Darüber hinaus unterstützen wir unsere Kunden bei der Modellierung von Erzeugungseinheiten sowie von Kraftwerken mit ihrem Netzanschluss zur Beurteilung der dynamischen Stabilität. 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: Bestimmung der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungsanlagen am Mittel-, Hoch- und Höchstspannungsnetz
- » DIN VDE V 0124-100: Prüfanforderung an Erzeugungseinheiten zum Anschluss und Betrieb am Niederspannungsnetz
- » DIN EN 61400-21: Messung und Bewertung der Netzverträglichkeit von netzgekoppelten Windenergieanlagen
- » FGW TR4: Modellierung und Validierung von Simulationsmodellen der elektrischen Eigenschaften von Erzeugungseinheiten
- » DIN EN 61683: Verfahren zur Messung des Wirkungsgrads von Stromrichtern
- » DIN EN 50530: Gesamtwirkungsgrad von Photovoltaik-Wechselrichtern
- » TLPE-HV-001: Bestimmung der Umwandlungseffizienz von bidirektionalen Umrichtern basierend auf DIN EN 50530
- » TLPE-HV-002 – Bestimmung des Wirk- und Blindleistungsverhaltens bidirektionaler Umrichter basierend auf der TR3 (Rev. 24)

**1** *Blick ins TestLab Power Electronics am neuen Standort in Freiburg.*





# FuE-INFRASTRUKTUR

Eine Besonderheit des Fraunhofer ISE ist seine hervorragende technische Infrastruktur. Über 16 700 m<sup>2</sup> Laborfläche mit hochmodernen Geräten und Anlagen sind Grundlage unserer Forschungs- und Entwicklungskompetenzen. Darunter sind derzeit über 16 000 m<sup>2</sup> Laborflächen und Werkhallen unterschiedlichen Standards sowie 634 m<sup>2</sup> zertifizierte Reinräume.

Die FuE-Infrastruktur des Fraunhofer ISE gliedert sich in sieben Laborzentren sowie vier produktionsnahe Technologie-Evaluationszentren:

- » 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
- » Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze
- » Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen
- » Zentrum für Optik und Oberflächenforschung
- » Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien
- » Zentrum für Materialcharakterisierung und Gebrauchsdaueranalyse
- » Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme
- » Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe





Wir bauen unsere technische Infrastruktur kontinuierlich weiter aus, sodass das Institut für seine Kunden stets Forschungs- und Entwicklungsprojekte auf dem neuesten Stand der Technik durchführen kann. So haben wir im Jahr 2018 das PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center grundlegend modernisiert.

2019 hat das Fraunhofer ISE sein Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze um einen neuen Standort in der Zinkmattenstraße in Freiburg erweitert. Dort steht uns nun eine weltweit einzigartige Infrastruktur mit einem eigenen Anschluss an das 110-kV-Hochspannungsnetz zur Verfügung. Ein Transformator mit 110 kV/20 kV/40 MVA sowie die zugehörigen Schaltanlagen und Kabeltrassen bilden das Rückgrat unserer Infrastruktur zur Entwicklung und Erprobung von Lösungen für einen zuverlässigen und sicheren Betrieb von leistungselektronikbasierten Netzen. Das »Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze« besteht aus drei Labors am Standort Zinkmattenstraße (Multi-Megawatt Lab, Medium-Voltage Lab, Power Converters Lab) und einem weiteren Labor in der Heidenhofstraße in Freiburg (Smart Energy Lab). Letzteres wird derzeit zum Digital Grid Lab modernisiert, sodass das Fraunhofer ISE dort seine Aktivitäten zur Analyse und Erprobung intelligenter Netze, Digitalisierung und intelligenter Betriebsführung bündeln kann.

*Bild: Mittelspannungsschaltanlage für den Anschluss der Prüffeldtransformatoren und Prüfeinrichtungen im »Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze«.*

# ZENTRUM FÜR LEISTUNGSELEKTRONIK UND NACHHALTIGE NETZE



## MULTI-MEGAWATT LAB

Mit unseren Aktivitäten im Multi-Megawatt Lab arbeiten wir an Lösungen, um moderne Wechselrichter zu Garanten eines sicheren und stabilen Netzbetriebs weiterzuentwickeln. Durch die umfangreiche elektrische Infrastruktur und unsere hochpräzise Messtechnik, die sich bis in die 110-kV-Ebene erstreckt, können wir Einzellösungen, Umrichtersysteme und Microgrids in einer realitätsnahen Umgebung erproben und die Auswirkungen auf das Stromnetz bis in den Multi-Megawatt-Bereich erforschen. Die verfügbare Anschlussleistung von bis zu ca. 10 MW ist für den Testbetrieb auch von großen PV- und Batteriewechselrichtern ein besonderer Vorteil. Unsere Testfelder verfügen über eine spezielle Prüfeinrichtung wie einen großen Klimaraum, einen hochdynamischen 1-MVA-Netzsimulator sowie eine »Fault Ride Through«-Testeinrichtung für kurzzeitige Unter- oder Überspannungen (UVRT/OVRT). Dies ermöglicht sowohl die Charakterisierung der dynamischen Eigenschaften von Wechselrichtern am Netz als auch Zuverlässigkeits- und Lebensdaueruntersuchungen.

**Technische Ausstattung (1):** Transformatoren-Prüffelder bis 6,4 MVA und von 260 V bis 1120 V | Hochpräzise, breitbandige Leistungsmessung auf NS-, MS- und HS-Ebene | PV-Simulatoren (2000 V / 1,4 MW) | Bidirektionaler DC-Quellen/Batteriesimulator (1500 V / 1 MW) | Hochdynamischer Netzsimulator (bis 1000 V / 1 MVA) | »Power-Hardware-in-the-Loop«-System (1 MVA / 20 kHz) | Stationäre UVRT- und OVRT-Testeinrichtung (10 MVA) | Mobiler UVRT/OVRT-Testcontainer (4,5 MVA) | Schaltbare L- und C-Lasten (7 Mvar) | Prüfstand zur Inselnetzserkennung (400 kVA) | Klimakammer Großgeräte (-30 °C bis +80 °C, einstellbare Luftfeuchte) | Hochgenaue Leistungsmessgeräte (1500 V / 5000 A)

## MEDIUM VOLTAGE LAB

In den Hallen des Mittelspannungslabors können Umrichtersysteme bis zu 20 MVA am 20-kV-Netz angeschlossen und mit den Prüfeinrichtungen des Labors getestet und vermessen werden. Die Tests am Mittelspannungsumrichter erfolgen von einem abgetrennten Steuerraum aus, um bei einer Fehlfunktion des Prüflings eine Gefährdung des Prüfpersonals auszuschließen. Die Prüfhalle des Mittelspannungslabors kann Container bis 40 Fuß aufnehmen. Alternativ können größere Systeme auch auf der Außenfläche errichtet werden. Darüber hinaus steht eine weitere Halle mit fünf unabhängigen Käfigzellen zur Verfügung. In den Käfigen werden z. B. Leistungsstacks von Mittelspannungsumrichtern, beziehungsweise generell Schaltungen jenseits der Niederspannung, entwickelt und in Betrieb genommen. In den Käfigen erfolgt auch die Vermessung von Bauelementen, besonders von Leistungshalbleitern aus Silicium oder Siliciumcarbid mit Sperrspannungen von 3,3 kV bis 15 kV. Für die Entwicklung und Voruntersuchung stehen diverse DC-Quellen, Transformatoren und Lastwiderstände zur Verfügung.

**Technische Ausstattung (2):** Prüffeld mit Mittelspannungsanschluss (20 kV/20 MVA) | Mittelspannungs-DC-Quelle (10–40 kV/3x 200 kW) | Mittelspannungswiderstand (12 kVΔ/20 kVY/1 MW) | MS-Transformator mit mehreren Unterspannungen (Dyn5, 20 kV/3-6-10-15-20-30 kV/2,5 MVA) | MS-Stelltransformator (Yyn0, 400 V/3-12 kV/100 kVA) | Bahnstromtransformator (16,7 Hz/15 kV/200 kVA) zum Anschluss an einen hochdynamischen Netzsimulator | Halbleiter-Teststände zur Charakterisierung von Leckströmen im nA-Bereich bei max. 30 kV, Avalanche-Effekten (bis 4 kV/100 A), Schaltverlusten (bis 20 kV/1000 A) | Alle Aufbauten geeignet für hochdynamische SiC-Halbleiter





2



3



4

## POWER CONVERTERS LAB

Auch unsere Forschungsaktivitäten im niedrigen und mittleren Leistungsbereich bis zu einer Systemspannung von bis zu 1500 V und einer Leistung von bis zu 400 kW sind am neuen Standort in Freiburg angesiedelt. Der Fokus liegt dabei auf Erforschung, Entwicklung und Erprobung von innovativen leistungselektronischen Systemen. Neue Halbleitertechnologien auf Basis von Siliciumcarbid (SiC) oder Galliumnitrid (GaN) ermöglichen uns die Realisierung von zukunftsweisenden Hardware-Designs. Gepaart mit den entsprechenden Kühlsystemen und der Hardware-nahen Regelungstechnik entwickeln wir dabei leistungselektronische Prototypen bis hin zu Vorseriengeräten. Bei all unseren Entwicklungen stehen neben der Leistungsdichte und dem Leistungsgewicht vor allem die Effizienz und die Gesamtsystemkosten im Vordergrund. Unser langjähriges Know-how setzen wir in vielfältigen Anwendungen, wie beispielsweise in der Photovoltaik, bei Energiespeichern, bei der Ladeinfrastruktur für die Elektromobilität sowie der Luft- und Raumfahrt, ein.

**Technische Ausstattung (3):** Maschinenemulator (160 kVA) und Netzsimulator (30 kW) | Lastwiderstand für DC- und AC-Spannungen (200 kW) | Programmierbare nichtlineare Lasten (3-ph, 230 V/16 A) | Hochauflösende, breitbandige Oszilloskope und Tastköpfe | Mehrkanalmesssysteme u. Präzisions-Leistungsmessgeräte | Messequipment EMV-Störungen (bis 200 A<sub>AC</sub> / 400 A<sub>DC</sub>) | Hochauflösende, hochfrequente Wärmebildkamera (Videos) | Präzisions-Induktivitätsmessgerät und Impedanzanalysator | Mehrortiger Vektor-Netzwerkanalysator | Hardware-in-the-Loop-(HIL)-System von OPAL-RT | Dampfphasen-Reflow-Lötsystem

## SMART ENERGY LAB WIRD DIGITAL GRID LAB

Die Digitalisierung des Stromnetzes und die Netzintegration von dezentralen Energiesystemen stehen im Fokus unserer Forschungsaktivitäten in unserem Smart Energy Lab. Um vernetzte dezentrale Energieversorgungssysteme noch realitätsnaher zu erforschen, bauen wir unser derzeitiges Labor zum künftigen Digital Grid Lab aus. Die Netzintegration wird dort durch einen Hardware-in-the-Loop-Netzsimulator bereitgestellt werden, der eine virtuelle Abbildung des Stromnetzes und der Automatisierungstechnik ermöglicht. Komplexe Netzabschnitte und Betriebssituationen können flexibel im Labormaßstab nachgebildet und die Wechselwirkung von Anlagen im Netz erprobt werden. Die Testumgebung kann das stationäre und dynamische Betriebsverhalten im Leistungsbereich eines typischen Niederspannungsnetzes oder Microgrids abbilden. Unsere Schwerpunkte liegen beim Netzbetrieb und dessen Automatisierung und Digitalisierung sowie bei der Energiemarktintegration. Besonders die Netzkopplung von Infrastruktur für Elektromobilität, die Aspekte der Systemtechnik und Betriebsführung von Microgrids sowie die Automatisierung von Netz- und Anlagenbetrieb rücken stärker in unseren Fokus.

**Technische Ausstattung (4):** Simulator für elektrische Last und Erzeugung | PV-Simulator mit variabler UI-Charakteristik und Zeitreihen des solaren Angebots | HIL-System zur Abbildung von Erzeugern, Lasten und Speichern (KWK, Batterien, WP, E-Fahrzeuge) | Teststand für vernetzte Energiemanagementsysteme und Smart Metering | Vernetzte Ladestationen für Elektrofahrzeuge | HIL-System für die Verteilnetzabbildung mit physikalischen Ein-/Ausgängen zur Integration von Hardware | Netzersatzanlage zur Erprobung



# TECHNOLOGIEEVALUATIONSZENTREN



## SiM-TEC – Silicon Material Technology Evaluation Center

Dr. Stephan Riepe | Telefon +49 761 4588-5636

Am SiM-TEC werden neue Technologien für die Produktion von Siliciumwafern für die Photovoltaik entwickelt und die dazu eingesetzten Materialien evaluiert. Wir führen Arbeiten an allen Technologieschritten für die Herstellung multikristalliner Wafer durch. Im Bereich des Kerfless Wafering untersuchen wir Prozesse zur elektrochemischen Porosifikation und die Abscheidung von Silicium mit Atmosphärendruck-Epitaxie im Hochdurchsatzverfahren. Zudem entwickeln wir die Epitaxie von hochreinem Siliciummaterial mittels des CVD-Verfahrens (Chemical Vapour Deposition) in einem kontinuierlichen Prozess. Für die elektrochemische Prozessierung von Siliciumwafern verfügen wir über eine Inline-Ätzanlage, die in mehreren elektrisch voneinander getrennten Becken verschiedene vollflächige (156 x 156 mm<sup>2</sup>) Ätzprozesse durchführen kann. Alle genannten Technologieschritte begleiten wir durch eine Vielzahl von Analytikmöglichkeiten und Simulationen.

<http://s.fhg.de/Wp8>



## PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center

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

Im PV-TEC stehen modernste Prozess- und Charakterisierungsgeräte für die Entwicklung von Siliciumsolarzellen zur Verfügung. Wir sind fokussiert auf Kernthemen der Produktionstechnologie und Messtechnik für kristalline Siliciumsolarzellen. Dazu entwickeln und evaluieren wir Herstellungsprozesse und Prozesstechnologiekomponenten, fertigen fortgeschrittene industrielle Solarzellenstrukturen, charakterisieren und entwickeln Materialien und Solarzellen, führen Schulungen und Trainings für PV-Technologie durch und transferieren Prozesse einschließlich der Vor-Ort-Unterstützung unserer Kunden. Das PV-TEC bedient Unternehmen aus allen Bereichen der PV-Wertschöpfungskette, wie Solarzellen- und Modulhersteller, Anlagen- und Materialhersteller (Silicium und Prozessmaterialien).

<http://s.fhg.de/6XZ>

### **Module-TEC – Module Technology Evaluation Center**

Stephan Hoffmann | Telefon +49 761 4588-2235

Das Module-TEC bietet umfassende Möglichkeiten zur Entwicklung von Modultechnologien. Unsere Schwerpunkte sind die Verschaltungstechnik von kristallinen Solarzellen, die Modulintegration von Hocheffizienzzellen sowie die Analyse und Optimierung der Moduleffizienz. Daneben entwickeln wir anwendungsspezifische Sondermodule z.B. für die Gebäude- und die Fahrzeugintegration. Mit unseren industriellen Produktionsanlagen und vielseitigen Analyseplattformen können wir neue Verbindungs- und Einkapselungstechnologien entwickeln. Innovative Materialien werden im Module-TEC in der Verarbeitung erprobt, Modulumuster und kleine Serien hergestellt. Für die Zellverbindung verarbeiten wir neben den üblichen fünf Bändchen pro Zelle auch Runddrähte (Multi-Wire), strukturierte Verbinder oder leitfähige Rückseitenfolien auf Zellen im Voll- und Teilformat. Alternativ können wir Modul-Strings in Schindelbauweise herstellen. Neben dem Löten ist auch die vollautomatisierte, schonende Verbindung der Solarzellen mit elektrisch leitfähigen Klebstoffen (ECA) möglich. Die Einkapselung erfolgt in unseren Laminatoren im Glas-Folie- oder Glas-Glas-Aufbau in flacher oder in gewölbter Form.

<http://s.fhg.de/c2w>



### **Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center**

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

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 Verarbeitung von Silikonem, die wir für die Herstellung von Optiken, zur 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 und Komponenten werden beschleunigte Alterungstests durchgeführt.

<http://s.fhg.de/UDM>



# FORSCHUNG- UND ENTWICKLUNGSZENTREN



## Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen

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

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

Wir evaluieren 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 die Rekorde für beidseitig kontaktierte Siliciumsolarzellen (26,0 %) und für multikristallines Silicium (22,3%). Auch bei Mehrfachsolarzellen halten wir mehrere Wirkungsgradrekorde, wie den für monolithische III-V-auf-Si-Solarzellen (34,1 %), aber auch den für die beste Vierfachsolarzelle unter konzentriertem Licht (46,1%). Um diese Spitzenstellung weiter auszubauen, werden wir 2020 ein neues Laborgebäude einweihen, das eine an die künftigen technologischen Herausforderungen angepasste Reinraumausstattung haben wird. Hier können auf mehr als 1000 m<sup>2</sup> modernster Laborfläche fortschrittliche PV-Technologien getestet und optimiert werden.

<http://s.fhg.de/34h>



## Zentrum für Optik und Oberflächenforschung

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

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

Anna Heimsath | Telefon +49 761 4588-5944

Wir entwickeln optisch-funktionale Oberflächen für eine Vielzahl von Anwendungen. Dazu setzen wir großflächige Beschichtungs- und Strukturierungsprozesse ein. In der Beschichtungstechnologie nutzen wir Sputterverfahren, um Lösungen für die Solarthermie, Photovoltaik, Energieeffizienz, Dünnschichtbatterien und Wasserstofftechnologie zu erarbeiten. Die Strukturierung der Oberflächen im Bereich von Mikro- und Nanometern ermöglicht verschiedenste optische wie auch nicht-optische Funktionalitäten. Die großflächige Herstellung solcher Strukturen in maßgeschneiderten Formen und Dimensionen ist die Grundlage für eine industrielle Umsetzbarkeit. Für die konzentrierende Photovoltaik und solarthermische Kraftwerke entwickeln und qualifizieren wir optische Komponenten. Wir bewerten die Konzentratoren, analysieren Verschmutzungen und entwickeln Reinigungsmöglichkeiten.

<http://s.fhg.de/Viv>



### Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien

Dr. Peter Schossig | Telefon +49 761 4588-5130

Wir prüfen und charakterisieren eine Vielzahl von Geräten und Komponenten für den Einsatz in der Gebäudetechnik. So analysieren wir Wärmeübergang und Druckverlust an charakteristischen Strukturausschnitten sowie an maßstabsgetreuen Wärmeübertragern mit unterschiedlichen Fluiden bis hin zur Vermessung von Verdichtern, Wärmepumpen und Kältemaschinen nach verschiedenen Normen und Regelwerken. Ein Schwerpunkt ist die Entwicklung und Bewertung von Komponenten für natürliche Kältemittel, wie u. a. Propan. Unser gesamtes Labor ist daher für Arbeiten mit brennbaren Kältemitteln ausgestattet, sodass wir Komponenten für Propan-Kältekreise entwickeln und optimieren können. Darüber hinaus entwickeln wir mit unseren Partnern individuelle Messverfahren, die den Entwicklungs- und Optimierungsprozess von Geräten und komplexeren Systemen durch realitätsnahe, dynamische Prüfabläufe, inklusive Hardware-in-the-Loop, zeit- und kosteneffizient gestalten. Zur Modellierung und Auslegung von Wärmeübertragern, Kältekreisen und Systemen setzen wir auch Simulationswerkzeuge ein.

<http://s.fhg.de/CNw>



### 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

Wir haben breite technische 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. Wir verfügen über besondere Expertise für die umfassende Untersuchung der Eigenschaften von Halbleitermaterialien, Solarzellen, Photovoltaikmodulen, thermochemischen und porösen Materialien, Phasenwechselmaterialien, Wärmeträgerflüssigkeiten, Polymeren sowie Beschichtungen auf Glas und Metallen. Wir entwickeln neue Methoden zur Materialcharakterisierung, besonders zerstörungsfreie Analyseverfahren, sowie zur Berechnung von Materialverhalten und Degradation. Wir untersuchen Materialien unter Anwendungsbedingungen in unterschiedlichen Klimazonen. Um die Leistungsfähigkeit und Gebrauchsdauer von Materialien abzuschätzen, nutzen wir Daten aus analytischen Messungen, dem Realbetrieb und aus beschleunigten Altersprüfungen.

<http://s.fhg.de/Y6c>





### **Zentrum für Energiespeichertechnologien und -systeme**

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

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

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. Unser besonderer Schwerpunkt liegt auf der 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 entwickeln wir optimierte Lade- und Betriebsführungsstrategien sowie Batteriesystemprototypen für verschiedenste Anwendungsgebiete. Zu unseren Tätigkeiten gehören auch die Modellierung und Simulation von Batterien.

<http://s.fhg.de/k7e>



### **Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe**

Prof. 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. Dazu verfügen wir über eine hervorragende technische Infrastruktur.

<http://s.fhg.de/a66>

## Redaktion

Christina Lotz, Susanne Mohr,  
Karin Schneider (verantwortlich)


## Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Kommunikation  
Heidenhofstr. 2  
79110 Freiburg  
Telefon +49 761 4588-5150  
Telefax +49 761 4588-9342  
info@ise.fraunhofer.de  
[www.ise.fraunhofer.de](http://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, 2020

## Hier halten wir Sie auf dem Laufenden

 Internet: [www.ise.fraunhofer.de](http://www.ise.fraunhofer.de)  
 Forschungsblog: [blog.innovation4e.de](http://blog.innovation4e.de)  
 Twitter: [FraunhoferISE](https://twitter.com/FraunhoferISE)  
 Facebook: [FraunhoferISE](https://www.facebook.com/FraunhoferISE)  
 YouTube: [FraunhoferISE-official](https://www.youtube.com/FraunhoferISE-official)

## Gestaltung und Druck

WEBERSUPIRAN.berlin  
triggermedien.de

## Copyrights

Angelini Innovation Center: Seite 10  
Mission Innovation: Seite 11  
(c) 2019, Wiley-VCH; J. Schube, T. Fellmeth, M. Jahn,  
Roman Keding, S. W. Glunz, Phys. Status Solidi RRL 2019,  
13, 1970034, <https://doi.org/10.1002/pssr.201970034>:  
Seite 26 Abb. 2  
BSQ Raphael Cervantes: Seite 31 Abb. 1 und 2  
BayWa r.e.: Seite 40  
Pohlen Solar GmbH: Seite 41  
ROWO Coating GmbH: Seite 48 Abb. 1  
RVK: Seite 56 Abb. 1  
webersupiran (iStock.com/foto-rolf, Fotolia/ctwelve,  
Dreamstime/Steamroller, iStock/Sean Pavone): Seite 57 Abb. 1  
iStock/Bettina Gál: Seite 58 Abb. 1  
Belectric GmbH: Seiten 60/61  
webersupiran (iStock/Wiyada Arunwaikit): Seite 63 Abb. 1  
Simon Dannhauer iStock/Grafik: triolog: Seite 63 Abb. 2  
Maria Parussel und Holger Vonder: Seite 78 unten  
Das Copyright aller anderen Bilder liegt beim Fraunhofer ISE.

## Fotografen

Gregor Bern: Seite 52 Abb. 2  
Markus Feifel: Seiten 28/29, 35  
Joscha Feuerstein: Seiten 54/55, 80 unten  
Guido Kirsch: Seite 9  
Korbinian Kramer: Seite 69  
Dirk Mahler: Titelbild, Seiten 20/21, 22/23, 24 Abb. 1,  
30, 32/33, 42/43, 49, 58 Abb. 1, 62 Abb. 1, 64, 72/73,  
74 Abb. 1, 75 Abb. 4, 76 unten, 77, 78 oben, 80 oben  
Jakob Metz: Seiten 44/45, 46 Abb. 1  
Marek Miara: Seiten 46 Abb. 2, 48 Abb. 2, 70, 79 oben  
Alexander Morgenstern: Seite 58 Abb. 2  
Bernd Schumacher Photodesign: Seiten 3, 6, 17  
Timo Sigurdsson: Seite 53 Abb. 2, 68 Abb. 1  
Michael Zentgraf: Seite 15



# VERANSTALTUNGEN 2020

MIT BETEILIGUNG DES FRAUNHOFER ISE

## Zukünftige Stromnetze

Berlin, 29.–30.01.2020

## E-World

Essen, 11.–13.02.2020

## SiliconFOREST

Falkau, 01.–04.03.2020

## Energy Storage Europe

Düsseldorf, 10.–12.03.2020

## IRES 2020

Düsseldorf, 10.–12.03.2020

## DKT Deutsche Kristall- züchtungstagung

München, 11.–13.03.2020

## Porous Semiconductors Science and Technology (PSST)

Lido di Camaiore, Italien,  
15.–20.03.2020

## Symposium Photo- voltaische Solarenergie

Kloster Banz, Bad Staffelstein,  
17.–19.03.2020

## LOPEC

München, 24.–26.03.2020

## International Battery Seminar

Orlando, Florida, USA,  
30.03.–02.04.2020

## HFC + f-cell

Vancouver, Kanada,  
01.–02.04.2020

## Urban Future Global Conference

Lissabon, Portugal,  
01.–03.04.2020

## 11<sup>th</sup> International Workshop on Crystalline Silicon for Solar Cells and 4<sup>th</sup> Silicon Materials Workshop

Lissabon, Portugal,  
20.–22.04.2020

## Hannover Messe

Hannover, 20.–24.04.2020

## OWPT Conference

Pacifico Yokohama, Japan,  
21.–23.04.2020

## Battery Show Europe

Stuttgart, 28.–30.04.2020

## CPV 16 – International Conference on Concentrator Photo- voltaic Systems

Denver, Colorado, USA,  
04.–06.05.2020

## PCIM

Nürnberg, 04.–07.05.2020

## IFAT

München, 04.–08.05.2020

## Heat Pump Conference

Jeju, Südkorea,  
11.–14.05.2020

## Symposium Thermische Solarenergie

Kloster Banz, Bad Staffelstein,  
12.–14.05.2020

## 14<sup>th</sup> SNEC PV POWER EXPO

Shanghai, China,  
25.–27.05.2020

## EMRS Spring Meeting

Strasbourg, Frankreich,  
25.–29.05.2020

## Silicon PV

Hangzhou, China,  
01.–05.06.2020

## EVS 33

Portland, Oregon, USA,  
14.–17.06.2020

## 47<sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference

Calgary, Kanada,  
14.–19.06.2020

## ICMOVPE

Stuttgart, 14.–19.06.2020

## Power Electronics Seminar

München, 15.–16.06.2020

## Intersolar Europe

München, 17.–19.06.2020

## IAEE International Conference 2020

Paris, Frankreich,  
21.–24.06.2020

## 39<sup>th</sup> International Energy Workshop

Freiburg, 29.06.–01.07.2020

## WHEC

Istanbul, Türkei  
05.–09.07.2020

## ISHPC

Berlin, 23.–26.08.2020

## CIREC

Paris, Frankreich, 24.–28.08.2020

## EU PVSEC

Lissabon, Portugal,  
07.–11.09.2020

## EPE-ECCE: European Conference on Power Electronics and Applications

Lyon, Frankreich,  
07.–11.09.2020

## ECSCRM European Conference on Silicon Carbide and Related Materials

Tours, Frankreich,  
13.–17.09.2020

## IAA Nutzfahrzeuge

Hannover, 24.–30.09.2020

## f-cell 2020

Stuttgart, 29.–30.09.2020

## Battery Experts Forum

Frankfurt, 29.09.–01.10.2020

## 26<sup>th</sup> Solar Paces

Albuquerque, New Mexico, USA,  
29.09.–02.10.2020

## Chillventa

Nürnberg, 13.–15.10.2020

## Electronica

München, 10.–13.11.2020