

Zahlen und Ergebnisse



Jahresbericht 2021/22

*Blick in den Reinraumflur des Zentrums für höchsteffiziente Solarzellen des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg. Das Gebäude wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und des Landes Baden-Württemberg finanziert und im April 2021 eingeweiht. Es verfügt über mehr als 1000 m<sup>2</sup> modernster Laborfläche – davon 740 m<sup>2</sup> Reinraum – und eine herausragende Infrastruktur, die es ermöglicht, die Leistungsfähigkeit von Solarzellen aus Silicium und III-V-Halbleitern auf ein neues Niveau zu heben. Ein zentrales Ziel ist, die theoretische Wirkungsgradgrenze von konventionellen Solarzellen durch die Tandemtechnologie zu überwinden und so eine noch höhere Energieausbeute pro Fläche zu erreichen.*

Zahlen und Ergebnisse



Jahresbericht 2021/22



## Vorwort

---

2021 feierte das Fraunhofer ISE sein [vierzigjähriges Bestehen](#). Wir sind stolz darauf, nicht nur in den frühen Jahren der Solarforschung Vorreiter in Deutschland gewesen zu sein, sondern bis heute die deutsche Energiewende als Impulsgeber zu begleiten. Musste das Institut in den Anfangsjahren noch Pionierarbeit leisten, so sind wir heute eng mit allen zentralen Institutionen und Akteuren aus Politik, Wirtschaft und Gesellschaft verknüpft.

Vierzig Jahre also, die sich gelohnt haben und deren Ergebnisse uns optimistisch stimmen können. Und dennoch bleiben viele Fragen offen: Wird es uns gelingen, bis 2045 klimaneutral zu leben und die globale Temperaturerhöhung auf weniger als 2 °C oder sogar 1,5 °C zu begrenzen? Wo liegen die Chancen und Risiken eines sich rasant wandelnden Energiesystems, das ohne fossile Energien auskommt? Gelingt es, die Gesellschaft bei den umfassenden neuen technologischen Entwicklungen und deren Implementierung mitzunehmen? Bei unserer Jubiläumsveranstaltung im November 2021 haben wir diese Fragen im Rahmen einer Podiumsdiskussion mit Vertretern aus Forschung, Politik und Industrie erörtert ([Seiten 18/19](#)).

Transformationsprozesse erleben wir aktuell nicht nur im Bereich der Energiesysteme, sondern auch, wenn es um ökonomische Fragen, Digitalisierung, Verteilung von Ressourcen oder Wohnraum geht. Die Corona-Pandemie hat uns die drängenden Probleme und Herausforderungen unserer Zeit in all ihren Facetten noch bewusster gemacht. Das gilt auch für die Veränderungen der Arbeitswelt. Wir sind froh, dies auch unter den schwierigen Bedingungen der letzten Monate gut gemeistert zu haben – unser Dank gilt dabei besonders dem großen Engagement aller Mitarbeitenden am Institut.

So ist es uns gelungen, unsere Forschungsinfrastruktur weiter auszubauen. Im April 2021 haben wir das neue Laborgebäude des »Zentrums für höchsteffiziente Solarzellen« eingeweiht, dessen Bau dank der Mittel des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) und des Landes Baden-Württemberg möglich war ([Seiten 50/51](#)). Ziel ist, hier verstärkt Tandem-Photovoltaiktechnologien zu entwickeln. Dabei werden Materialien mit unterschiedlichen elektronischen Eigenschaften wie III-V-Halbleiter, Perowskite oder Silicium zusammengeführt. Dies erlaubt die Überwindung der physikalischen Wirkungsgradgrenze von konventionellen Solarzellen aus nur einem Solarzellenmaterial und birgt große Einsparpotenziale bei Solarzellen und Modulmaterialien – ein wichtiger Schritt hin zu mehr Nachhaltigkeit in der Photovoltaik.

Auch durch unsere Mitarbeit in Gremien und Beraterstäben sind wir in regelmäßigem Austausch mit Forschung, Industrie und Politik. Dank seiner breiten Expertise ist das Institut hierbei sowohl national als auch international vertreten. So ist Dr. Peter Schossig, Bereichsleiter Thermische Systeme und Gebäudetechnik, 2021 als Experte in das Collaboration Programme on Heat Pumping Technologies der Internationalen Energieagentur (HPT IEA) berufen worden. Da Wärmepumpen in der Zukunft die dominierende Heiztechnologie in einem Netto-Null-Energiesystem bis 2050 sein werden, arbeitet das Fraunhofer ISE intensiv an neuen, marktreifen [Wärmepumpentechnologien](#) sowohl für Bestandsgebäude als auch für Neubauten.

Im Bereich der Wasserstofftechnologien, die eine tragende Säule der Energiewende – besonders im Schwerlastverkehr, der Schifffahrt und der Industrie – darstellen werden, wurde Prof. Dr. Christopher Hebling, Bereichsleiter Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeicher, zum Vizepräsidenten des Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verbands (DWV) ernannt.

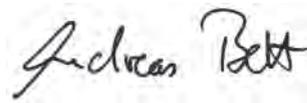
Um unserer Arbeit zum Durchbruch zu verhelfen, ist eine gute, seriöse und zielgruppengerechte Kommunikation nach außen unabdingbar. Das Fraunhofer ISE war im Berichtszeitraum das am häufigsten zitierte Institut innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft. In diesem Kontext möchten wir Karin Schneider, langjährige Leiterin Kommunikation, für ihr Engagement und ihre hervorragende Arbeit zur Steigerung von Bekanntheit und Image des Fraunhofer ISE danken. Sie hat das Institut im August 2021 verlassen. Christina Lotz hat die Nachfolge der Leitung der Kommunikationsabteilung übernommen. Wir wünschen ihr viel Erfolg bei dieser Aufgabe.

Um neue Technologien zum Erfolg zu führen und Forschungsergebnisse in Industrie und Gesellschaft zu transferieren, bedarf es einer klaren, aber auch kontinuierlich angepassten strategischen Ausrichtung ([Seiten 22/23](#)). Deshalb haben wir drei Zeithorizonte und Zielvorgaben für das Institut definiert, die es ermöglichen, unsere [Mission und unsere Leitsätze](#) auf operativer Ebene zu konkretisieren und unser Leistungsportfolio anzupassen. Wichtig ist uns hierbei ein »holistisches« Vorgehen, das die Aspekte Nachhaltigkeit, Kundenbedürfnisse, Wissenschaft, Qualität und Prozesse sowie Vernetzung und Zusammenarbeit gleichermaßen berücksichtigt. Künftig wollen wir noch stärker Fragen der Nachhaltigkeit und der geschlossenen Rohstoffkreisläufe in den Mittelpunkt unserer Forschungs- und Entwicklungsarbeit, aber auch unseres Institutsbetriebs, stellen.

Unseren Kuratoren, Auditoren, Stipendiengebern, Ansprechpartnern und Förderern in den Ministerien auf Bundes- und Länderebene sowie unseren Projektpartnern möchten wir unseren großen Dank für ihre Unterstützung und Förderung des Fraunhofer ISE aussprechen. Wir freuen uns auf die weitere Kooperation, um gemeinsam den dringend notwendigen Transformationsprozess hin zu einem nachhaltigen und zugleich sozial gerechten Energiesystem voranzutreiben.



Prof. Dr. Hans-Martin Henning



Prof. Dr. Andreas Bett

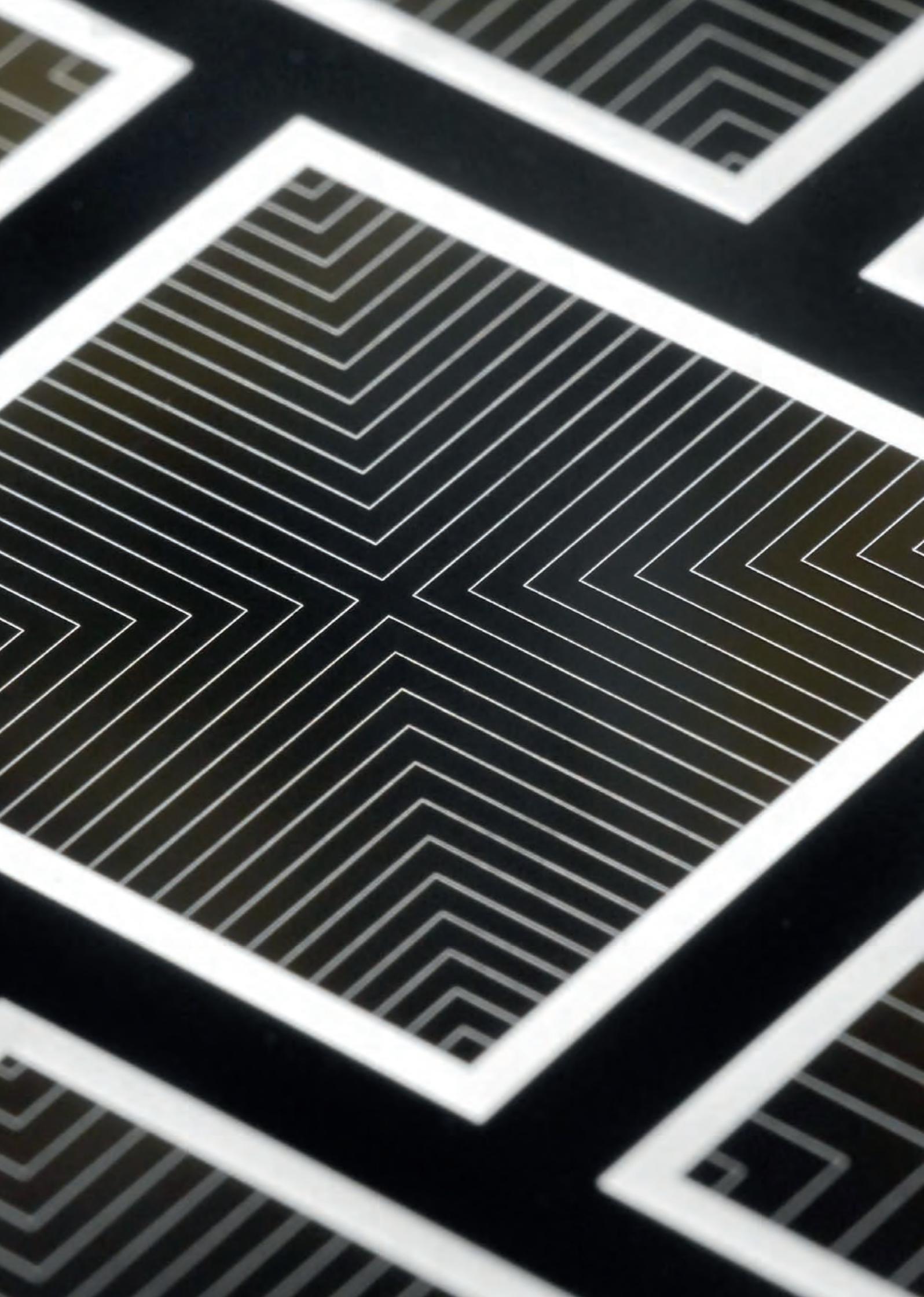
# Inhalt

---

Daten und Zahlen .....	6
Strategie und Geschäftsbereiche .....	20
Highlights unserer Forschung .....	52
Veranstaltungen 2022 .....	88
Impressum .....	89
Bildnachweise .....	90

Regelmäßige Infos zu  
Meilensteinen unserer  
Forschung bieten  
unsere Newsletter!





# Daten und Zahlen



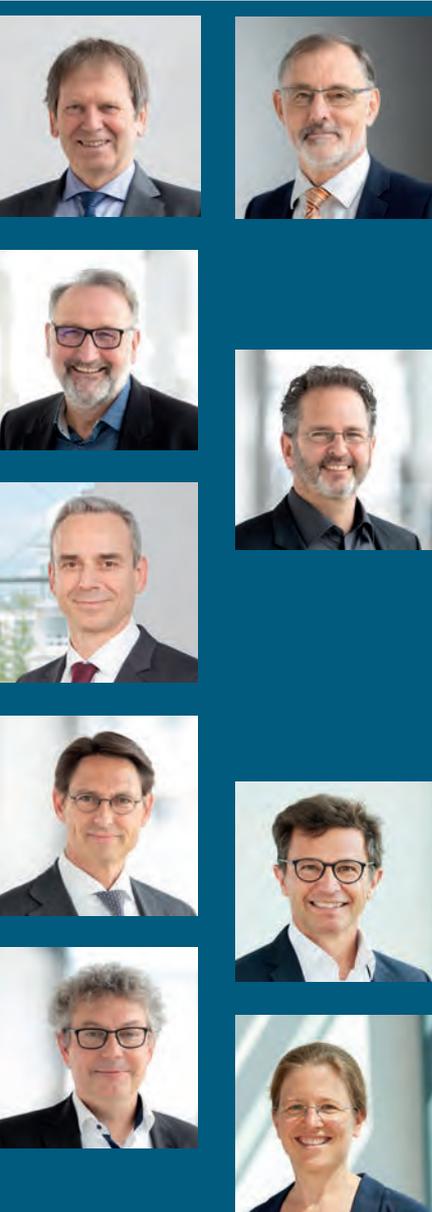


# Inhalt

---

Organisationsstruktur .....	8
Kuratorium .....	9
Das Institut in Zahlen .....	10
Profil .....	12
Kooperationen .....	13
Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft .....	14
Preise und Auszeichnungen .....	15
Promotionen .....	16
Vierzig Jahre Forschung für die Energiewende .....	18

# Organisationsstruktur



Die Organisationsstruktur des Fraunhofer ISE gliedert sich neben Verwaltung und Stabsstellen in die beiden großen wissenschaftlichen Bereiche »Photovoltaik« sowie »Energietechnologien und -systeme«.

In der Außendarstellung operieren wir zudem mit marktorientierten Geschäftsfeldern:

- Photovoltaik
- 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)

**Prof. Dr. Eicke R. Weber**  
(Institutsleiter 2006–2016)

## Institutsleitung

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

Telefon +49 761 4588-5134

**Prof. Dr. Andreas Bett**

Telefon +49 761 4588-5257

## Verwaltungsdirektion

**Saskia Vormfelde**

Telefon +49 761 4588-5336

## 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

*Prof. Dr. Hans-Martin Henning;  
Prof. Dr. Andreas Bett;  
Prof. Dr. Stefan Glunz;  
Dr. Ralf Preu; Dr. Harry Wirth;  
Prof. Dr. Christopher Hebling;  
Prof. Dr. Christof Wittwer;  
Dr. Peter Schossig;  
Saskia Vormfelde*

# Kuratorium

---

Das Kuratorium begutachtet die Forschungsprojekte und berät die Institutsleitung und den Vorstand der Fraunhofer-Gesellschaft bezüglich des Arbeitsprogramms des Fraunhofer ISE.

## Vorsitzender

### **Burkhard Holder**

VDE Renewables GmbH, Alzenau

## Mitglieder

### **Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer**

Drees & Sommer SE, Stuttgart

### **Dr. Klaus Bonhoff**

Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV), Berlin

### **Ullrich Bruchmann**

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Berlin

### **Dipl.-Ing. Daniel Etschmann**

Kreditanstalt für Wiederaufbau, Frankfurt

### **Jürgen Heizmann**

AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn

### **Ministerialdirigent Günther Leßnerkraus**

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

### **Prof. Dr. Wolfram Münch**

EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Karlsruhe

### **Dr. Stefan Reber**

TPRC GmbH, Gundelfingen

### **Dr. Norbert Schiedeck**

Vaillant Group, Remscheid

### **Peter Schneidewind**

RENA Technologies GmbH, Gütenbach

### **Prof. Dr.-Ing. Armin Schnettler**

Siemens New Energy Business, München

### **Dr. Lioudmila Simon**

E.ON Group Innovation, Essen

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

ads-tec GmbH, Nürtingen

### **Prof. Dr. Frithjof Staiß**

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

### **Prof. Dr. Anke Weidenkaff**

Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS, Alzenau

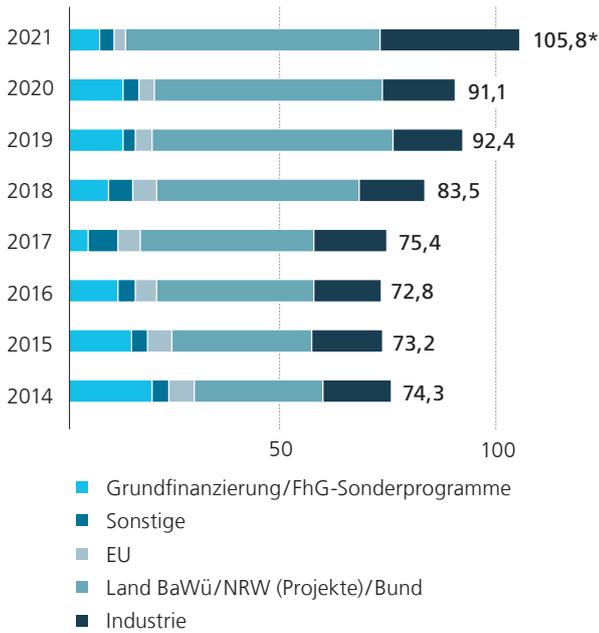
### **Prof. Dr. Anke Weidlich**

Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg

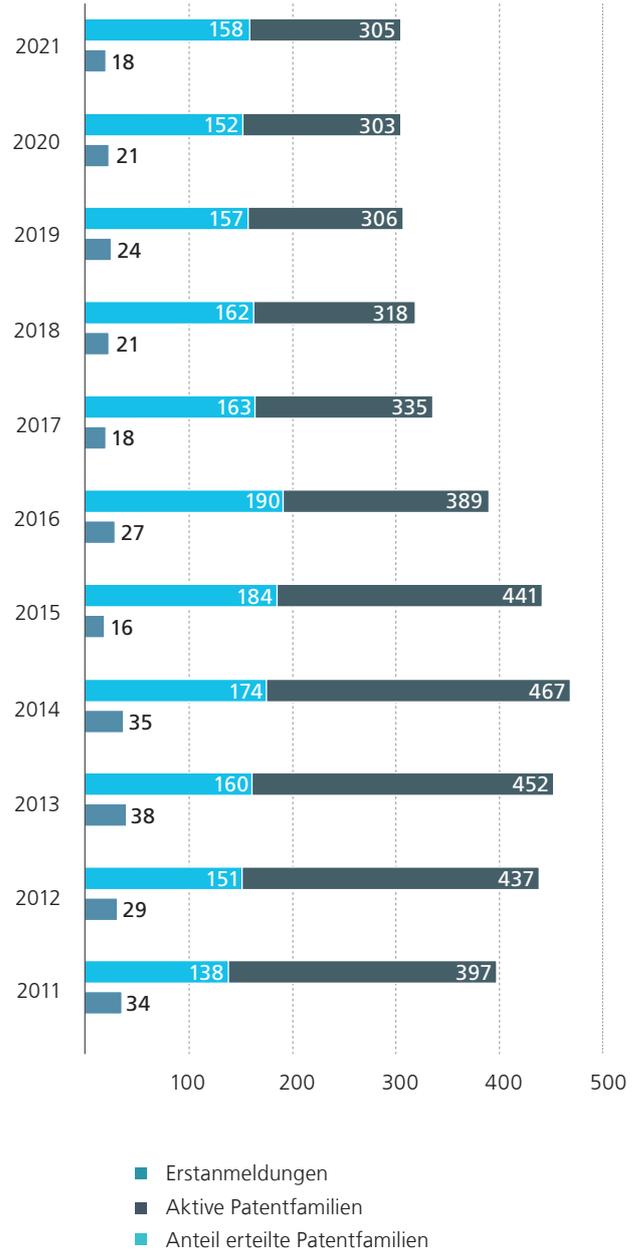
(Stand: 31.12.2021)

# Das Institut in Zahlen

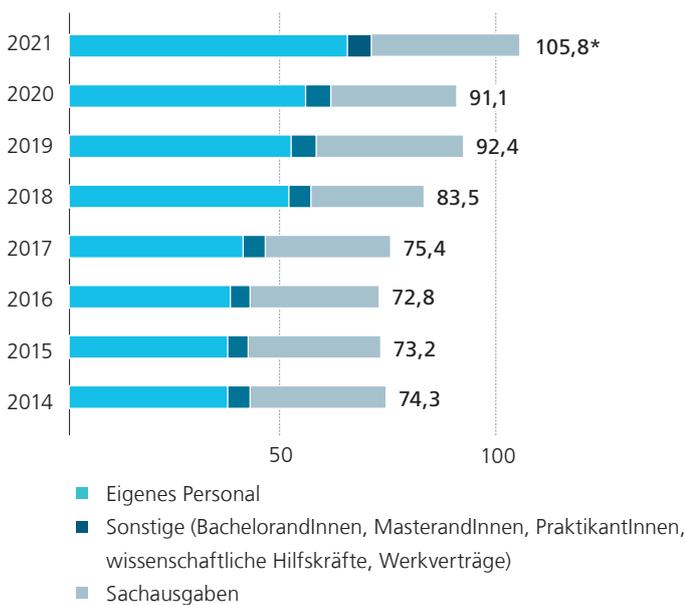
## Entwicklung der Erträge in Mio €\*\*



## Patente

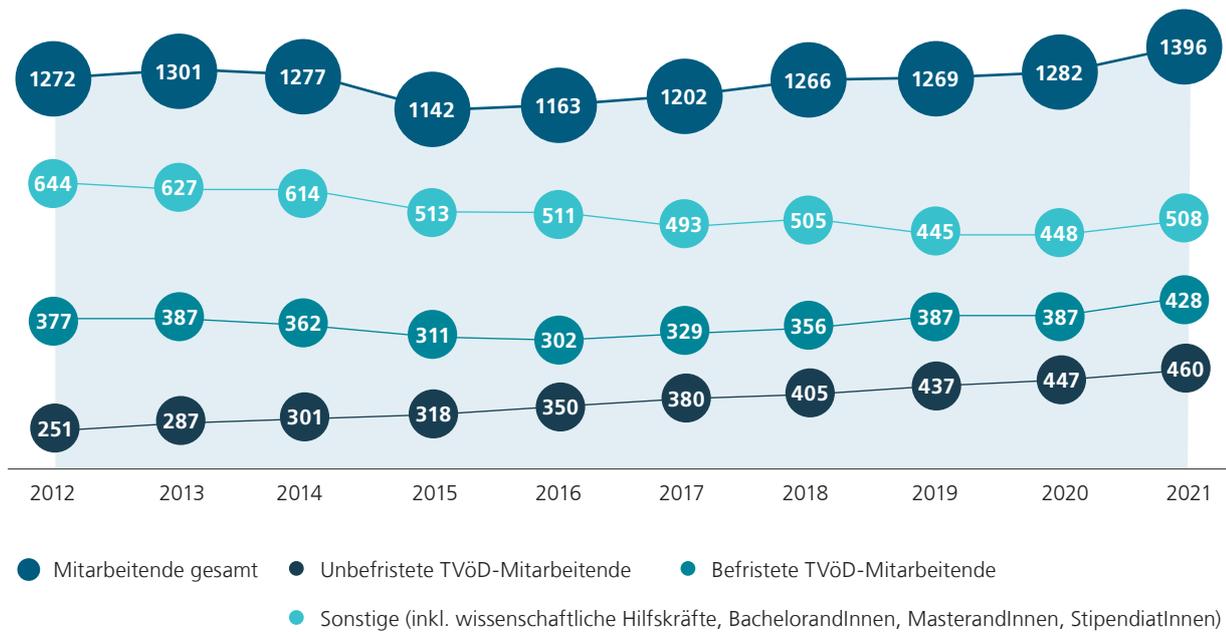


## Entwicklung der Ausgaben in Mio €\*\*

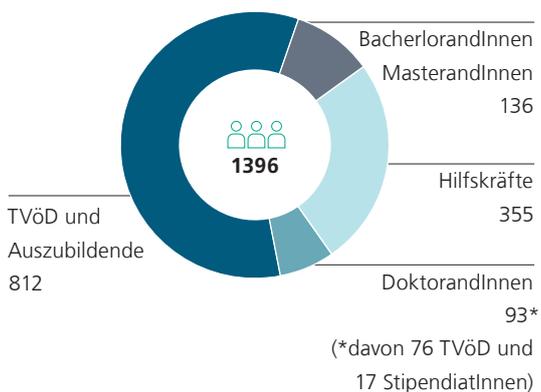


\* Vorläufig \*\* Ohne Investitionen – der Gesamthaushalt 2021 (inkl. Investitionen) betrug 118,1 Mio €.

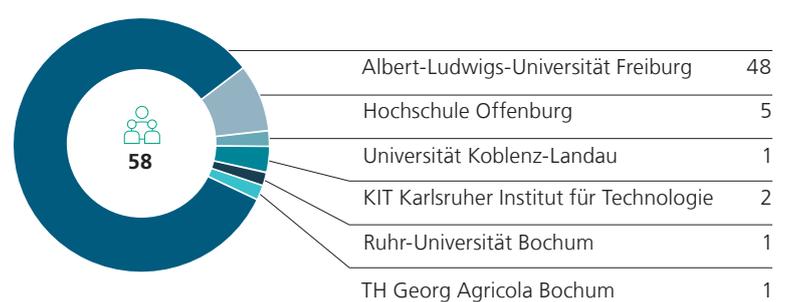
 **Entwicklung der Mitarbeitendenzahlen**



**Personalstruktur**



**Lehrveranstaltungen**



48 WissenschaftlerInnen des Fraunhofer ISE sind neben ihrer Forschungstätigkeit auch in der Lehre tätig.

# Profil

## Zielsetzung

Das 1981 in Freiburg gegründete Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE ist das größte Solarforschungsinstitut in Europa und beschäftigt aktuell fast 1 400 Mitarbeitende. Unser Ziel ist, mit unserer Forschung zum Erhalt unseres Planeten beizutragen und die Lebensgrundlage heutiger und zukünftiger Generationen zu sichern. Wir setzen uns für ein nachhaltiges, wirtschaftliches, sicheres und sozial gerechtes Energieversorgungssystem auf der Basis erneuerbarer Energien ein. Diese Zielsetzung spiegelt sich in den Forschungsschwerpunkten Energieeffizienz, nachhaltige Energiebereitstellung, Energieverteilung und Energiespeicherung wider. Da die Transformation des bestehenden Energiesystems ein globales Thema ist, erstrecken sich unsere Forschungsaktivitäten sowohl auf Industrie- als auch auf Schwellen- und Entwicklungsländer. Neben einer Grundfinanzierung über die Fraunhofer-Gesellschaft finanziert sich das Fraunhofer ISE zu rund 93 % durch Aufträge in den Bereichen angewandte Forschung, Entwicklung und Hochtechnologie-Dienstleistungen. 2021 betrug der Gesamtetat des Instituts 118,1 Millionen Euro.

*Das Hautgebäude des  
Fraunhofer ISE in Freiburg.*



## Forschungsansatz

Unser Anspruch ist, konkret umsetzbare technische Lösungen zu entwickeln, die wir unseren Industriepartnern zur Verfügung stellen. Damit tragen wir dem Fraunhofer-Prinzip der angewandten Forschung Rechnung und leisten zugleich einen wichtigen Beitrag zur deutschen und europäischen Standort-sicherung und Wettbewerbsfähigkeit. Der Erfolg angewandter Forschung erfordert zugleich einen Austausch mit Politik und Gesellschaft, den wir in unsere Arbeiten einbeziehen. Das Fraunhofer ISE ist in fünf marktorientierte Geschäftsfelder ([Seite 26 ff.](#)) unterteilt. Unser Forschungsansatz reicht von der Materialforschung über die Entwicklung von Komponenten bis hin zur Systemintegration.

## Leistungen

Das Fraunhofer ISE verfügt über eine hervorragende technische Infrastruktur. 20 900 m<sup>2</sup> Laborfläche – darunter 1 070 m<sup>2</sup> Reinraumfläche – sowie hochmoderne Geräte und Anlagen bilden die Grundlage unserer Forschungs- und Entwicklungskompetenzen. Unsere hochmoderne FuE-Infrastruktur auf höchstem technischem Niveau umfasst acht Forschungs- und Entwicklungszentren sowie vier produktionsnahe Technologie-Evaluationszentren ([Seiten 44/45](#)). Darüber hinaus bietet das Institut in seinen nach DIN EN ISO/IEC 17025 akkreditierten Labors Prüf- und Zertifizierungsleistungen an. Damit sind wir in der Lage, als zuverlässiger Partner zu agieren und FuE-Projekte auf den unterschiedlichen Stufen im Lebenszyklus von Technologien umzusetzen – je nach Auftrag, Bedarf oder Reifegrad.

Unsere Leistungen umfassen:

-  Neues Material/Verfahren
-  Prototyp/Kleinserie
-  Patent/Lizenz
-  Software/Anwendung
-  Messtechnische Analyse/Qualitätssicherung
-  Beratung/Planung/Studie

# Kooperationen

---

Wissenschaftliche Exzellenz lebt vom fachlichen Austausch. Das Fraunhofer ISE ist in ein hervorragendes Netzwerk sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene eingebunden.

## Außenstandorte

Das Fraunhofer-Center für Silizium-Photovoltaik CSP in Halle wird vom Fraunhofer ISE gemeinsam mit dem Fraunhofer-Institut für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IWMS betrieben. Die dort vom Fraunhofer ISE adressierten Themenfelder betreffen Kristallisation und Wafering von Halbleitern sowie das Recycling.

International ist das Institut an einer Kooperation in Südamerika direkt beteiligt, dem Fraunhofer Chile Research – Centro para Tecnologías en Energía Solar (FCR-CSET) in Santiago, Chile, das die thematischen Schwerpunkte solare Stromerzeugung, Solarthermie, Aufbereitung von Wasser und Prozesswärme bearbeitet.

## Kooperationen mit Hochschulen

Ein starker Fokus des Fraunhofer ISE liegt auf der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Derzeit sind 48 Mitarbeitende in der Lehre tätig, das Institut zählt ca. 230 Bachelor-, Master-, und Promotionsstudierende und unterhält mehrere Kooperationen mit Universitäten und Hochschulen in Deutschland und weltweit.

Besonders intensiv ist die Zusammenarbeit mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Im Oktober 2015 wurde das Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) mit seinen Schwerpunkten Nachhaltige Materialien, Energiesysteme und Resilienz an der Technischen Fakultät gegründet. Das INATECH basiert auf einer engen Partnerschaft zwischen der Universität Freiburg sowie den fünf Freiburger Fraunhofer-Instituten. Dieses Fundament macht das INATECH einzigartig in der Forschungslandschaft und ermöglicht es, die gesamte Bandbreite von der Grundlagenforschung bis hin zur industriellen Anwendung abzudecken. Ergänzt wird diese Kooperation durch das [»Leistungszentrum Nachhaltigkeit«](#), das die



*Institutsgebäude des Fraunhofer-Centers für Silizium-Photovoltaik CSP in Halle.*

Vernetzung mit nachhaltigkeitsorientierten Unternehmen, Verbänden und sonstigen Akteuren aus Freiburg, der Region und darüber hinaus fördert.

Auch bei vielen anderen zentralen Institutionen und Aktivitäten der Uni Freiburg bringt sich das Fraunhofer ISE ein. So konnten wir mit unserer Expertise im Bereich der Photovoltaik dazu beitragen, das strategisch wichtige Exzellenzclusterprojekt livMatS einzuwerben. Seit mehr als zwei Jahrzehnten besteht eine enge Zusammenarbeit mit dem Freiburger Materialforschungszentrum FMF, in dem beispielsweise Aktivitäten zur Organischen Photovoltaik angesiedelt sind. Ebenso besteht traditionell eine enge Kooperation mit den Fakultäten für Physik, für Umwelt und Natürliche Ressourcen sowie für Chemie.

Zu den von der Universität mit Unterstützung des Fraunhofer ISE auf den Weg gebrachten Studiengängen zählen die Masterstudiengänge »Sustainable Systems Engineering« sowie »Renewable Energy Engineering and Management« und »Solar Energy Engineering«. Darüber hinaus kooperiert das Fraunhofer ISE national und international mit vielen weiteren Hochschulen.

## Memorandums of Understanding

Zudem hat das Fraunhofer ISE weltweit Memorandums of Understanding mit über 30 Unternehmen, Organisationen und Forschungseinrichtungen abgeschlossen. Auf nationaler wie internationaler Ebene ist das Institut in Forschungs- und Branchenverbänden gut vernetzt.

# Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft

---

Systemische Fragestellungen erfordern die Zusammenführung einer großen Bandbreite von Kompetenzen. Die Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft stärkt dieses Anliegen.

## Verbünde und strategische Forschungsfelder

Die Fraunhofer-Institute arbeiten in kompetenzorientierten Verbänden zusammen. Das Fraunhofer ISE ist gemeinsam mit vier anderen Instituten Mitglied im [Fraunhofer-Verbund Energietechnologien und Klimaschutz](#), der im Januar 2021 gegründet wurde. Prof. Dr. Hans-Martin Henning hat die Rolle des Sprechers dieses Verbunds übernommen. Zudem ist das Fraunhofer ISE Gastmitglied im Fraunhofer-Verbund Werkstoffe, Bauteile – MATERIALS.

Um gezielter auf Forschungsthemen der Zukunft reagieren zu können und wissenschaftlich-technische Alleinstellungsmerkmale zu schaffen, definiert die Fraunhofer-Gesellschaft zudem strategische Forschungsfelder. Das Fraunhofer ISE ist in zwei der sieben Felder durch eine Sprecherrolle federführend vertreten: Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning ist zusammen mit Prof. Dr. Welf-Guntram Drossel, Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU, Sprecher des Forschungsfelds »Ressourceneffizienz und Klimatechnologien«. Prof. Dr. Christopher Hebling, Bereichsleiter Wasserstofftechnologien am Fraunhofer ISE, ist gemeinsam mit Prof. Dr. Mario Ragwitz von der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG als Sprecher für das Forschungsfeld »Wasserstofftechnologien« zuständig.

## Leitmarktorientierte Fraunhofer-Allianzen

Neben wissenschaftlicher Exzellenz steht in der anwendungsorientierten Forschung auch die Exzellenz im Hinblick auf den Transfer in Wirtschaft und Gesellschaft im Fokus. Vor diesem Hintergrund hat die Fraunhofer-Gesellschaft seit 2020 acht Leitmärkte definiert, die prioritär von leitmarktorientierten Allianzen adressiert werden.

Das Fraunhofer ISE ist nicht nur eines der zwanzig Mitgliedsinstitute der [Fraunhofer-Allianz Energie](#), sondern seit deren Gründung im Jahr 2003 auch Sitz der Geschäftsstelle. Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning vertritt als Sprecher die Ziele der Allianz nach außen. Gemeinsam mit den Fraunhofer-Allianzen Batterie und SysWasser, in denen das Fraunhofer ISE ebenfalls aktives Mitglied ist, organisiert die Fraunhofer-Allianz Energie den gemeinschaftlichen Marktzugang ihrer Mitgliedsinstitute und bedient die Bedarfe des Leitmarkts Energiewirtschaft. Als einer der größten Energieforschungsverbände Europas bietet sie Forschungs und Entwicklungsdienstleistungen in den Geschäftsfeldern Energie Erneuerbar, Energie Speicher, Energie Effizient, Energie Digital, Energie System, Energie Urban, Energie Netze sowie Klima und Umwelt.

Zur weiteren Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft zählen die Mitgliedschaften in den Fraunhofer-Allianzen Bau und Space sowie im [Fraunhofer Cluster of Excellence Integrierte Energiesysteme CINES](#), den Fraunhofer-Netzwerken Intelligente Energienetze, Nachhaltigkeit und Wasserstoff sowie der »Morgenstadt-Initiative« der Fraunhofer-Gesellschaft.

# Preise und Auszeichnungen

---

**Dr. Katharina Braig, Dr. Markus Glatthaar,  
Dr. Thibaud Hatt, Dr. Leonard Tutsch**

Gewinner des Science4Life Energy Cup, Geschäftskonzept »PV2plus«, Science4Life, 02.03.2021

**Dr. Katharina Braig, Dr. Markus Glatthaar,  
Dr. Thibaud Hatt, Dr. Leonard Tutsch**

3. Platz für hervorragende Innovationsleistung beim Innovationswettbewerb der Verbände BDE, BDSV und VDM, »PV2plus«, BDE, BDSV, VDM, 18.03.2021

**Dr. Henning Helmers, Dr. Oliver Höhn,  
Dr. David Lackner et al.**

Best Paper Award, «Non-Uniform Illumination Impacts on O-Band InGaAsP and Metamorphic GaInAs Photonic Power Converters«, OWPT Conference, 19.–22.04.2021

**Dr. Tim Niewelt**

SiliconPV Award, Paper »State-of-the-Art Reassessment of the Intrinsic Bulk Recombination in Crystalline Silicon«, SiliconPV 2021, 19.–23.04.2021

**Andreas Wessels**

3. Platz Poster Award, »Farbige gebäudeintegrierte solarthermische Kollektoren mit hohem Wirkungsgrad«, Solarthermie-Symposium, 27.–30.04.2021

**Dr.-Ing. Sebastian-Johannes Ernst**

Wissenschaftspreis des Coburger Convents, Dissertation »Development and Characterization of Advanced Materials for Heat Transformation Applications«, Coburger-Convent-Akademie, Mai 2021

**Cornelius Armbruster**

2. Platz Poster Award, »Untersuchung verschattungsoptimierter Halbzellenmodule mit einlaminiertes Leistungselektronik (LE) für das MPP-Tracking auf Substring-Ebene«, 36. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2021, 25.05.2021

**Rebekka Denninger**

3. Platz Poster Award, »Bereitstellung der Regelleistung durch netzbildende Wechselrichter am Beispiel der Systemauftrennung vom 08.01.2021«, 36. Symposium Photovoltaische Solarenergie 2021, 25.05.2021

**Dr. Jörg Schube**

UMSICHT-Wissenschaftspreis, Kategorie Wissenschaft Dissertation »Metallization of Silicon Solar Cells with Passivating Contacts« an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, 24.06.2021

**Dr. Markus Feifel**

Gips-Schüle-Nachwuchspreis, Ehrenurkunde Kategorie Technikwissenschaften, Dissertation »Hocheffiziente III-V-Mehrfachsolarzellen auf Silicium« an der Universität Konstanz, Gips-Schüle-Stiftung, 27.07.2021

**David Fischer, Arne Groß, Antonia Lenders**

Hans-Jürgen Appelrath Best Paper Award, Conference Paper »Comparison of Short-Term Electrical Load Forecasting Methods for Different Building Types«, 10<sup>th</sup> DACH+ Conference on Energy Informatics, 16.09.2021

**Dr. Alexander Bett**

Eva-Mayr-Stihl-Nachwuchsförderpreis 2021 der Universität Freiburg, Dissertation »Perovskite Silicon Tandem Solar Cells – Two-Terminal Perovskite Silicon Tandem Solar Cells Using Optimized n-i-p Perovskite Solar Cells«, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 20.10.2021

**Dr. Stefan Henninger, Dr. Saskia Kühnhold-Pospischil,  
Nicole Nierlich, Julia Packetat**

1. Platz BestChance Award 2021, Konzept zur Prävention und Intervention in Bezug auf sexuelle Belästigung und Gewalt am Arbeitsplatz, Fraunhofer-Gesellschaft, 24.11.2021

**Dr. Harry Wirth**

Fraunhofer-Taler  
Besonderes Engagement »Fakten zur Photovoltaik«  
Fraunhofer-Gesellschaft, 15.12.2021

# Promotionen

---

## **Puzant Baliozian**

»Development and Characterization of Bifacial p-Type Silicon Shingle Solar Cells with Edge Passivation«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

## **Andreas Beinert**

»Thermomechanical Design Rules for the Development of Photovoltaic Modules«  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2021

## **Christian Bischoff**

»Herstellung und Charakterisierung von Zink-Ionen-Batteriezellen für stationäre Anwendungen«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

## **Nicolas Carbonare**

»Occupant-Centered Control Strategies for Decentralized Residential Ventilation«  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2021

## **Angela De Rose**

»Evaluation of Solder Joints on Aluminum Surfaces for the Interconnection of Silicon Solar Cells«  
Universität Rostock, 2021

## **Lena Emmer (geb. Mohr)**

»Strömungs- und Reaktionsmodellierung sowie deren experimentelle Untersuchung in einem chemischen Prozessbecken für die Herstellung von Silizium-Solarzellen«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

## **Dorian Guzman Razo**

»An Adaptive Model of PV Power Output«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

## **Thibaud Hatt**

»Electroplating Based on Self-Passivated Aluminium Masking for Metallization of Silicon Heterojunction Solar Cells«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

## **Ulrike Heitmann**

»Development of a ZnO-Based Transparent Conductive Adhesive for the Application in III-V/Silicon Tandem Solar Cells«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

## **David Hermann**

»Characterization of Metallization-Induced Recombination Losses of Screen-Printed Silicon Solar Cells«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

## **Clarissa Hofmann**

»Control of Upconversion Luminescence for Photovoltaics Using Photonic Structures«  
Universität Karlsruhe, 2021

## **Jonas Huyeng**

»Printable Boron Dopant Sources for Silicon Photovoltaics«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

## **Robin Lang**

»Defekte in III-V-Halbleitermaterialien des GaInAsP-Systems«  
Universität Konstanz, 2021

## **Eric Laurenz**

»Frequency Response Analysis of Heat and Mass Transfer in Adsorbent Composites and Simplified Performance Estimation for Heat Transformation Applications«  
Technische Universität Hamburg, 2021

## **Christoph Luderer**

»Transport Properties of Thin-Film Passivating Contacts for Silicon Solar Cells«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

## **Juan Franciso Martinez Sanchez**

»Development of Hybrid Concentrator/Flat-Plate Photovoltaic Technology to Reach the Highest Energy Yield«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021



**Mohammad Hassan Norouzi**

»Plasma-Based Multifunctional Surface Modification and Laser Doping Technologies for Bifacial PERL/PERC c-Si Solar Cells with Selective Emitter«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

**Daniel Ourinson**

»Advancement and Evaluation of the Firing Process for Silicon Solar Cells with High-Temperature Pastes«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

**Lazhar Rachdi**

»Characterization of Plasmas for the Deposition of Thin Films for Crystalline Silicon Solar Cells«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

**Kasimir Reichmuth**

»Effekte in der akkuraten *I-V*-Charakterisierung von Mehrfachsolarzellen bei einer Sonne und bei hohen Bestrahlungsstärken«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

**Ahmed Ismail Ridoy**

»Maskless Dry Texturing Methods for Crystalline Silicon Solar Cells«  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2021

**Shahab Rohani**

»Reducing the Water Footprint of Concentrated Solar Power Plants. Techno-Economic Assessment of Water Saving Solutions for CSP Plants«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

**Waldemar Schreiber**

»Elektrochemisches Ätzen und Tempern mesoporöser Germaniumschichten für die Verwendung als ablösbare Epitaxievorlage«  
Universität Osnabrück, 2021

**Christian Sonner**

»Generische Auslegung eines Sorptionsbettes zur Aufnahme von natürlichen Kältemitteln bei unterschiedlichen Leckagen«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2020

**Laura Stevens**

»Strukturierte Sol-Gel-Antireflexoberflächen zur Optimierung von Lichteinkopplung in der Silicium-Photovoltaik«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

**Sebastian Tepner**

»Contribution to the Understanding of Screen Printing and its Implication for the PV Industry«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

**Lukas Wagner**

»Perovskite Photovoltaic Modules with a Very Low CO<sub>2</sub>-eq Footprint: The in situ Technology«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

**Julian Weber**

»Lokale Laserdiffusion zur Herstellung hocheffizienter Siliziumsolarzellen«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2021

# Vierzig Jahre Forschung für die Energiewende – das Fraunhofer ISE feiert Jubiläum



**Wir in Baden-Württemberg sind wirklich stolz, dass wir das ISE bei uns haben.«**

**Ministerialdirektor Michael Kleiner**  
Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und  
Tourismus Baden-Württemberg, Stuttgart

**»Wir müssen national, regional und kommunal noch schneller werden, noch schneller runterkommen vom fossilen Energieverbrauch.«**

**Christine Buchheit**  
Bürgermeisterin Stadt Freiburg

2021 feierte das Fraunhofer ISE als größtes europäisches Solarforschungsinstitut sein vierzigjähriges Bestehen. Zu verdanken hat es seine Gründung dem Solarpionier und ersten Institutsleiter Prof. Dr. Adolf Goetzberger, dessen klares Ziel schon damals die Ablösung fossiler Energieträger durch erneuerbare Energien war. Heute hat diese Idee einen Namen, der in aller Munde ist: die Energiewende.

In den vergangenen Jahren gab es viele kleine und große Erfolge, Meilensteine und technologische Durchbrüche des Fraunhofer ISE – beispielhaft genannt seien 1992 der Bau des ersten energieautarken Solarhauses, die Einweihung des Photovoltaic Technology Evaluations Centers im Jahr 2006, die erfolgreiche Übertragung der HERIC®-Topologie für Wechselrichter in die Industrie 2003 oder die solare Wasserstoff-Tankstelle 2012. Die am Institut entwickelten PV-Technologien erzielten nicht nur zahlreiche Wirkungsgradrekorde wie die für multikristalline Siliciumsolarzellen (22,3 %), beidseitig kontaktierte Siliciumsolarzellen mit TOPCon-Technologie (26,0 %), III-V-Silicium-Tandemsolarzellen (35,9 %) sowie eine III-V-Vierfach-Konzentratorzelle (46,1%), sie fanden auch ihren Weg in die Industrie. Der Anspruch, Wissen vom Labor in die Praxis zu transferieren, spiegelt sich in der breit gefächerten Ausrichtung: Da der Umbau der Energieversorgung auf erneuerbare Energien nicht bei der Energiebereitstellung endet, beschäftigen sich unsere Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auch mit nachhaltiger Energieverteilung, -speicherung und -nutzung.

Neben technologischen Fragen werden zudem die Aspekte einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft, Ressourcen- und



Abbildungen von links nach rechts:

Kosteneffizienz, aber auch der politischen und gesamtgesellschaftlichen Rahmenbedingungen immer dringlicher. So belegte die jüngst aktualisierte Studie des Fraunhofer ISE [»Wege zu einem klimaneutralen Energiesystem – Die deutsche Energiewende im Kontext gesellschaftlicher Verhaltensweisen«](#) den hohen Einfluss gesellschaftlichen Verhaltens auf Aufwand und Kosten des Umbaus des Energiesystems.

Warum aber gibt es nicht mehr Solarpanels auf den Dächern? Brauchen wir mehr technologische Pilotprojekte? Oder gar eine Solarpflicht? Und wie wiederum ließe sich diese Forderung mit den demokratischen Grundprinzipien vereinbaren? Diese Fragen haben anlässlich des vierzigjährigen Jubiläums Vertreterinnen und Vertreter aus Forschung, Politik und Wirtschaft im Rahmen der Podiumsdiskussion »Nachhaltige Forschung für die Energiewende – und für die Generationen nach uns« erörtert. Im Fokus stand die Frage nach der Akzeptanz in der Bevölkerung.

Dr. Sebastian Gözl, Sozialwissenschaftler am Fraunhofer ISE, wies in diesem Zusammenhang darauf hin, dass eine Akzeptanz im Sinne eines bloßen »Hinnehmens« nicht ausreichend sei. Denn am Ende, so Gözl, gehe es um Begeisterung, darum, ein Bewusstsein für das Thema zu schaffen – ein klarer Auftrag für mehr Aufklärung, beispielsweise über die Elektrifizierung von Wärme und Mobilität oder die Tatsache, dass PV-Strom die Bevölkerung nicht teurer zu stehen kommt als fossil erzeugter Strom. Dr.-Ing. Britta Buchholz von Hitachi Energy ergänzte, der Bevölkerung fehle es oft an technischem Wissen – das gelte vor allem für den Gebäude- und den Verkehrssektor. Auch Institutsleiter Prof. Dr. Hans-Martin Henning sprach sich für mehr Beteiligung der Bürger aus – besonders auf kommunaler und auf Quartiersebene.

Die DiskutantenInnen kamen zu dem Schluss, dass die Technologien zwar in weiten Teilen einsatzbereit seien, ihre Implementierung aber zu schleppend voranschreite. Walburga Hemetsberger von SolarPower Europe forderte daher: »Das schnelle Hochskalieren muss von der Politik unterstützt werden.« Neben Forderungen an die Politik sei es aber unerlässlich, stärker in die Gesellschaft hineinzuwirken. »Letztendlich ist es jeder Einzelne, der beitragen kann«, so Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Bett.

*Podiumsdiskussion des Fraunhofer ISE. V.l.n.r.: Axel Wagner (Moderator), Dr.-Ing. Britta Buchholz (Hitachi Energy), Prof. Dr. Hans-Martin Henning, Walburga Hemetsberger (SolarPower Europe), Dr. Sebastian Gözl, Prof. Dr. Andreas Bett.*

*Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Bett (links) und Prof. Dr. Hans-Martin Henning (rechts) mit den ehemaligen Institutsleitern Prof. Dr. Joachim Luther (Mitte) und Prof. Dr. Eicke R. Weber sowie dem ehemaligen stellvertretenden Institutsleiter Prof. Dr. Volker Wittwer (zweiter von links).*

*140 Gäste folgten der Einladung zum vierzigjährigen Institutsjubiläum.*

*Die Abendveranstaltung bot Gelegenheit zum Austausch und Netzwerken.*

# Strategie und Geschäftsbereiche





**Regelmäßige Infos zu  
Meilensteinen unserer  
Forschung bieten  
unsere Newsletter!**

# Inhalt

- Quo vadis, Energiewende? . . . . . 22**
- Tandem-Photovoltaik . . . . . 24**
- Geschäftsfelder . . . . . 26**
  - Silicium-Photovoltaik . . . . . 26
  - III-V- und Konzentrator-Photovoltaik . . . . . 28
  - Perowskit- und Organische Photovoltaik . . . . . 30
  - Photovoltaische Module und Kraftwerke . . . . . 32
  - Energieeffiziente Gebäude . . . . . 34
  - Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse . . . . . 36
  - Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeicher . . . . . 38
  - Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme . . . . . 40
- Das Fraunhofer ISE – ein zuverlässiger Partner . . . . . 42**
- FuE-Infrastruktur . . . . . 44**
- Akkreditierte Labors . . . . . 46**
- Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen . . . . . 50**

# Quo vadis, Energiewende?

## Ein Gespräch mit den Institutsleitern Prof. Dr. Hans-Martin Henning und Prof. Dr. Andreas Bett

### **Die Europäische Union und die neue Bundesregierung haben die Zielvorgaben für die CO<sub>2</sub>-Neutralität verschärft. Wo stehen wir aus Ihrer Sicht mit der Energiewende?**

*Bett:* »Der European Green Deal und die Bundestagswahl haben sicherlich einen großen Einfluss auf den weiteren Fortgang der Energiewende. Die Umgestaltungsprozesse müssen deutlich beschleunigt werden. Nur so ist eine CO<sub>2</sub>-Reduktion der Emissionen in Deutschland um 65 % bis 2030 überhaupt noch zu schaffen. Zudem ist eine angepasste Industriepolitik erforderlich, die sich an den klimapolitischen Vorgaben orientieren sollte. Die Regierung muss jetzt wirklich loslegen.«

*Henning:* »Besonders wichtig erscheinen mir der Bürokratieabbau und die Beschleunigung von Genehmigungsverfahren. Hier bestehen unnötige Hemmnisse durch überkomplexe Regeln und Verordnungen, durch oftmals ein historisch gewachsenes Dickicht an Vorgaben. Die Hoffnung ist, dass die neue Regierung hier die Dinge neu ordnen und beschleunigen kann.«

### **Das Fraunhofer ISE unterstützt mit Forschungs- und Entwicklungsprojekten die Industrie auf dem Weg zur Klimaneutralität. Was benötigen die Unternehmen, um hierbei erfolgreich zu sein?**

*Henning:* An vielen Stellen ist die Wirtschaft deutlich weiter als die Politik. Immer mehr Unternehmen engagieren sich, um ihre eigenen Betriebe in Richtung Klimaneutralität zu entwickeln. Aber sie benötigen ein klares Bekenntnis, dass dies von der Politik unterstützt und durchgehalten wird. Verlässliche, transparente politische Rahmenbedingungen sind für die Wirtschaft entscheidend. An der einen oder anderen Stelle ist noch finanzielle Förderung zur initialen Marktentwicklung erforderlich. An erster Stelle aber stehen konsistente, langfristige Regelungen. Wichtig wären dabei harmonisierte und noch wirksamere CO<sub>2</sub>-Bepreisungssysteme.«

### **Sie haben verschiedene Studien zu möglichen Transformationspfaden zu einem klimaneutralen Energiesystem vorgelegt. Wie technologieoffen ist die Energiewende noch?**

*Henning:* »Technologieoffenheit ist für Forschung und Entwicklung sehr wichtig, aber wir haben für das Erreichen der Klimaziele nur noch einen begrenzten Zeithorizont. Besonders im Hinblick auf die erforderliche Infrastruktur – wie Strom- und Gasnetze oder Ladesäulen – werden wir Jahre, wenn nicht Jahrzehnte von der Planung bis zur finalen Umsetzung brauchen. Hier müssen jetzt Weichenstellungen vorgenommen und Entscheidungen gefällt werden, um Planbarkeit für die Wirtschaft zu erzielen.«

### **Welche FuE-Schwerpunkte ergeben sich daraus für das Fraunhofer ISE?**

*Bett:* »Es gibt noch viel zu tun, einerseits bei systemischen Fragestellungen, aber auch bei Komponenten – auch wenn die wesentlichen Technologien für die Energiewende bereits heute zur Verfügung stehen. Unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten setzen auf die evolutionäre Weiterentwicklung dieser Technologien, z. B. auf die Optimierung der Produktion im Hinblick auf Effizienz und geschlossene Ressourcenkreisläufe sowie auf die Verlängerung der Gebrauchsdauer von Materialien und Komponenten. Unsere Vision ist es, die Energiewende wirklich nachhaltig umzusetzen.«

*Henning:* »Das Energiesystem der Zukunft wird viele Millionen neue Wandler, Verteilsysteme, Speicherkomponenten etc. benötigen. Das ist eine große Herausforderung, vor allem wegen der dafür notwendigen Materialien. Wir wollen daran arbeiten, hierfür umfassende nachhaltige Technologien, Verfahren und Systemlösungen zur Verfügung zu stellen.«

### **Sie sprechen die Nachhaltigkeit der Produktion an. Wie wird sich das auswirken?**

*Bett:* »Zunächst geht es darum, Produktlebenszyklen, aber auch die Produktionsprozesse genauestens zu analysieren. Dazu gehört, die verwendeten Materialien, ihre Herkunft und ihre Verarbeitung in den Blick zu nehmen. Zudem geht es darum,



Prof. Dr. Andreas Bett.

eine Kreislaufwirtschaft in Gang zu setzen, Bauteile wiederzuverwenden, Materialien rückzuführen. In diesem Kontext setzen wir uns auch für eine Wiederansiedlung der PV-Produktion entlang der Wertschöpfungskette in Europa ein. So kann zum Beispiel der Transportaufwand eingespart werden, was ökologisch wie ökonomisch Vorteile hat. Ein weiterer Aspekt ist der verstärkte Einsatz digitaler Verfahren, etwa um Ausschuss zu minimieren.«

### **Das Fraunhofer ISE hat 2021 sein neues Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen eingeweiht. Welche Erwartungen sind daran geknüpft?**

*Bett:* »Wir treiben dort die Forschung an Tandemsolarzellen voran. Dabei werden verschiedene Halbleitermaterialien aufeinandergestapelt, um höhere Wirkungsgrade zu erzielen. Höhere Wirkungsgrade bedeuten weniger Materialeinsatz und einen geringeren Bedarf an Fläche. Im neuen Zentrum intensivieren wir diese Tätigkeiten, besonders im Bereich Tandemsolarzellen auf Silicium. Wir gehen davon aus, dass es noch etwa fünf bis zehn Jahre intensiver FuE-Arbeiten bedarf, bis Tandemsolarzellen ein Mainstream-Produkt werden.«

### **Welche Herausforderungen sehen Sie noch seitens der Infrastruktur und der Systeme?**

*Henning:* »Eine Netzinfrastruktur zu entwickeln, die große Mengen erneuerbaren Stroms aufnehmen kann und trotzdem hohe Netzqualität und Versorgungssicherheit gewährleistet, ist nach wie vor eine zentrale Herausforderung. Die Entwicklung netzbildender Umrichtersysteme spielt dabei eine maßgebliche Rolle. Und elektrische Speicher rücken zunehmend in den Fokus. Wir haben umfassende Kompetenzen zu Batterien – vom Material über die Zelle bis zum System – entwickelt und bauen unsere technische Infrastruktur und Kapazitäten weiter aus. Einen besonderen Schwerpunkt legen wir auf stationäre Großspeichersysteme, beispielsweise in Quartieren oder Kraftwerks- und Gewerbestandorten. Generell beobachten wir von Seiten der Industrie in wachsendem Maße Anfragen nach systemischen Lösungsansätzen, um Standorte und Produktionsprozesse klimaneutral zu gestalten. Beispielsweise weiten wir unsere umfangreichen Erfahrungen mit Wärmepumpen



Prof. Dr. Hans-Martin-Henning.

im Gebäudesektor auf Großwärmepumpen für Industrie und Wärmenetze aus und haben hierzu erste Forschungsprojekte, auch in Zusammenarbeit mit anderen Fraunhofer-Instituten, gestartet. Unser Ziel ist es, Gesamtlösungen für Unternehmen und Liegenschaften zu entwickeln.«

### **Wie wirkt sich das auf die Zusammenarbeit mit Ihren Kunden und Partnern aus?**

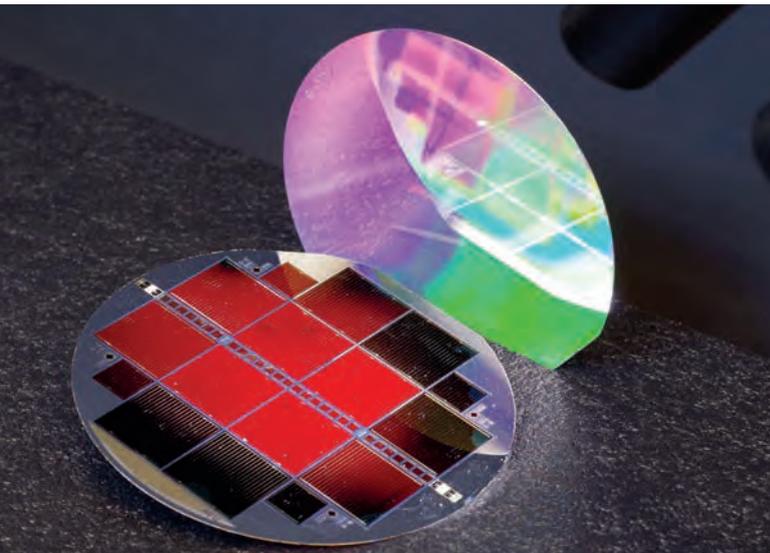
*Bett:* »Seit Gründung des Fraunhofer ISE verfolgen wir viele technologische Ansätze in der Breite und betrachten die Energiewende ganzheitlich. Unsere Kunden schätzen dies, da wir so verschiedene Kompetenzen zusammenbringen und Synergien schaffen. Wo wir das als Fraunhofer ISE selbst nicht können, nutzen wir unseren Verbund mit den anderen Fraunhofer-Instituten. Wir wollen ein zuverlässiger Partner für die Industrie sein und deren Bedürfnisse im Blick haben. Langjährige, zufriedene Kunden zu haben, ist auch ein Aspekt unserer Nachhaltigkeitsvision.«

### **Politik und Industrie haben in den vergangenen Jahren das Thema Wasserstoff stärker in den Fokus gerückt. Das Fraunhofer ISE berät die Fraunhofer-Gesellschaft und die Bundesregierung zu diesem Thema. Wie sehen Sie die weitere Entwicklung?**

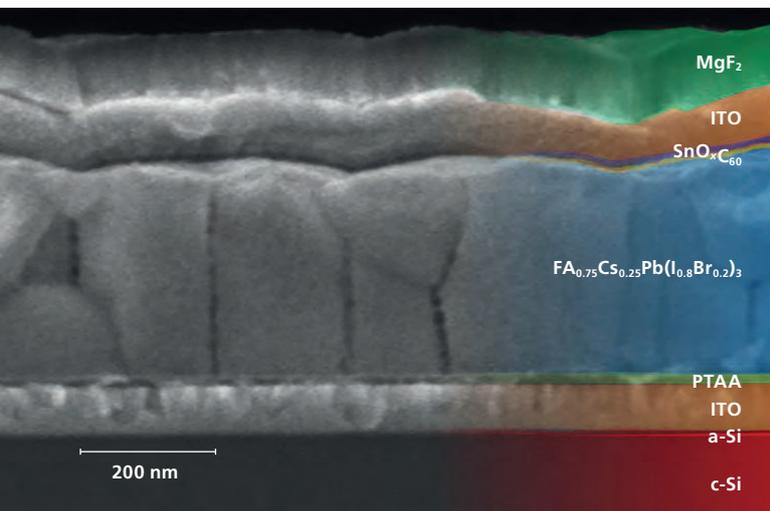
*Henning:* »Wasserstoff und aus Wasserstoff hergestellte Moleküle, wie Methanol, OME\* oder Ammoniak, werden sich zu einer Multi-Milliarden-Industrie entwickeln. Anders als in vielen Energieanwendungen können fossile stoffliche Energieträger und Chemierohstoffe, die heute im Schiffs- und Luftverkehr und der Industrie eingesetzt werden, nicht direkt durch Strom ersetzt werden. Das Fraunhofer ISE hat daher bereits früh auf Wasserstoff gesetzt, sodass wir über ein breites FuE-Portfolio zur Wasserstoffherstellung und dessen Rückverstromung in Brennstoffzellen sowie auch zur Konversion in unterschiedlichste Moleküle verfügen. Wir bemerken von Seiten der Politik und der Industrie ein sehr stark wachsendes Interesse daran. Diesem werden wir weiter gerecht werden.«

\* OME (Oxymethylenether) können aus Wasserstoff und CO<sub>2</sub> hergestellt werden und fossile Kraftstoffe ersetzen.

# Tandem-Photovoltaik – der Weg zu höheren Wirkungsgraden



Solarzellen, die nur aus einem Halbleitermaterial wie zum Beispiel Silicium aufgebaut sind, dominieren den aktuellen Photovoltaikmarkt. Aus physikalischen Gründen bleiben sie allerdings auf Wirkungsgrade unter 30 % beschränkt – ein Wert, der aufgrund der beeindruckenden Steigerung in der industriellen Produktion von 0,5 % pro Jahr in naher Zukunft eine reale Begrenzung darstellt. Deshalb ist es ein zentrales Forschungsziel der Photovoltaik, Tandemsolarzellen zu entwickeln, bei denen zwei oder mehr Halbleiter mit unterschiedlichen Energiebandlücken zum Einsatz kommen. Solche Tandemsolarzellen sind zwar bereits standardmäßig im Weltraum in Gebrauch, die Massenfertigung für terrestrische Anwendungen stellt jedoch höhere Anforderungen hinsichtlich Herstellungskosten und Hochskalierung. Viele Forschungsgruppen in Universitäten, Instituten und in der Industrie arbeiten daher aktuell an diesen Fragestellungen.



Das Fraunhofer ISE spielt in diesem spannenden Feld eine besondere Rolle. Zum einen entwickeln wir seit mehr als zwanzig Jahren erfolgreich Mehrfachsolarzellen aus III-V-Halbleitern für Weltraumanwendungen und die [konzentrierende Photovoltaik](#) und konnten dabei [eine ganze Reihe von Weltrekorden](#) erzielen. Diese Expertise zusammen mit unserer exzellenten Siliciumsolarzellentechnologie ([Seite 58](#)) haben uns geholfen, auch bei siliciumbasierten Tandemsolarzellen wie [III-V auf Silicium](#) oder [Perowskit auf Silicium](#) sehr gute Ergebnisse zu erzielen. Unser neues Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen ([Seiten 50/51](#)) bietet uns dabei exzellente experimentelle Möglichkeiten. Zum anderen haben bei uns aber auch die sorgfältige Charakterisierung und [Kalibrierung](#) der komplexen Tandemsolarzellen eine langjährige Tradition – ein Angebot, das auch von anderen führenden Forschungsgruppen regelmäßig genutzt wird.

oben:  
III-V-Silicium-Tandemsolarzelle  
mit 35,9% Wirkungsgrad.

unten:  
Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer  
Perowskit-Silicium-Tandemsolarzelle im Querschnitt.

Neben dieser umfangreichen Solarzellenkompetenz ist das Fraunhofer ISE in der Lage, die gesamte technologische Bandbreite von der Materialentwicklung bis zur Integration in das System abzudecken. Denn die erfolgreiche Entwicklung von Tandemsolarzellen ist nur der erste Schritt für die Implementierung der Tandem-Photovoltaik: III-V- und Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen erreichen zwar im Labor bereits beeindruckende Wirkungsgrade, doch wie sieht zum Beispiel eine industriell kompatible Metallisierung dieses neuen Zelltyps aus? Und wie können die Zellen zuverlässig und langzeitstabil in ein Modul integriert werden? Hier kommen die Technologie-Evaluationszentren [PV-TEC](#) und [Module-TEC](#) des Fraunhofer ISE ins Spiel.

Perowskit-Halbleiter vertragen die hohen Prozesstemperaturen, die beim Feuern von Silberkontakten verwendet werden, nicht. Im PV-TEC entwickeln wir daher neue Kontaktierungstechnologien ([Seite 62](#)), die mit niedrigen Prozesstemperaturen auskommen und besonders wenig Silber verbrauchen.

Zentrale Voraussetzung für eine erfolgreiche PV-Technologie ist ihre Langlebigkeit im Einsatz. Perowskit-Halbleiter sind bekannt für ihre Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit. Deswegen haben wir im Module-TEC eine spezielle Einkapselungstechnologie entwickelt, mit deren Hilfe Perowskit-Silicium-Tandemmodule den harten Damp-Heat-Test und die anderen vorgeschriebenen IEC-Tests\* überstehen. Auch die Verschaltung dieser empfindlichen Zellen stellt die Industrie vor große Herausforderungen, für die wir am Fraunhofer ISE Lösungen erarbeiten und so unsere Entwicklungspartner in diesem dynamischen Technologiefeld unterstützen.



*oben:*  
FlexTrail-Metallisierung von Solarzellen mit besonders geringem Silberverbrauch (links), Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines FlexTrail-Kontaktfingers (rechts).

*unten:*  
Strukturierter Verbinder zur seriellen Verschaltung von Silicium-Perowskit-Solarzellen mittels elektrisch leitfähigem Kleber (ECA).

\* Tests zur Überprüfung der Modulzuverlässigkeit gemäß der International Electrotechnical Commission

# Silicium-Photovoltaik

---



**PV-Module aus Siliciumsolarzellen sind eine wichtige Säule der Energiewende. Wir forschen, um sie noch leistungsfähiger zu machen.«**

**Dr.-Ing. Ralf Preu,  
Prof. Dr. Stefan Glunz**  
Bereichsleiter  
Silicium-Photovoltaik

## Position im Markt

Über 90 % aller Solarzellen weltweit werden aus kristallinem Silicium hergestellt. Schlüssel für diese dominierende Stellung sind ein hoher Wirkungsgrad, ein kostengünstiger großskaliger Herstellungsprozess sowie die jahrzehntelange Lebensdauer der Produkte. Gerade der Wirkungsgrad spielt für die weitere Kostensenkung der Stromgestehungskosten und eine verbesserte Ressourceneffizienz eine entscheidende Rolle und steht deshalb im Mittelpunkt unserer Aktivitäten. 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, beispielsweise in unseren industrienahen Technologiezentren PV-TEC und SiM-TEC und dem neu eröffneten Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen. Die wissenschaftliche und technologische Kompetenz unserer über 300 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter reicht dabei vom Siliciummaterial über die Solarzelle und das Modul bis hin zum System. So können unsere Kooperationspartner nicht nur auf einzelne Technologien zugreifen, sondern über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg mit uns zusammenarbeiten.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	313
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	60
 Vorträge und Konferenzbeiträge	73
 Neu erteilte Patente	10

## Ausgewählte Projekte 2021

 [BUSSARD – Busbarlose Solarzellen mit passivierten Kontakten für Modulintegration der nächsten Generation](#)

 [INNOMET – Entwicklung innovativer Drucktechnologien für die Feinlinien-Metallisierung von Si-Solarzellen](#)

 [Reassessment of the Intrinsic Bulk Recombination in Crystalline Silicon](#)

 [Design Rules for High-Efficiency both-sides-contacted Silicon Solar Cells with Balanced Charge Carrier Transport and Recombination Losses](#)

 [PrEsto – Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen: Entwicklung skalierbarer Prozesstechnologien](#)

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu diesem Geschäftsfeld



# III-V- und Konzentrator-Photovoltaik

---



**Die konzentrierende Photovoltaik ermöglicht höchste Effizienzen. Deshalb wollen wir diese Technologie zu wirtschaftlichem Erfolg führen.«**

**Dr. Frank Dimroth**  
Abteilungsleiter  
III-V- und Konzentrator-  
Photovoltaik

## Position im Markt

Je stärker die Gesellschaft auf die Photovoltaik setzt, desto wichtiger wird es, Flächenverbrauch zu minimieren, die Effizienz der Energiewandlung zu erhöhen und nachhaltigere Produkte zu entwickeln. Mehrfachsolarzellen aus III-V-Halbleitern haben bereits gezeigt, dass Wirkungsgrade von 47 % unter konzentriertem Sonnenlicht möglich sind. Wir setzen insbesondere Tandemstrukturen aus III-V-Halbleitern mit Germanium oder Silicium ein. Die III-V-Zellen mögen hohe Intensitäten und werden bei etwa 1000-facher Sonnenlichtkonzentration eingesetzt.

Aber auch beim klassischen Silicium kann man von moderater Konzentration profitieren. Dazu entwickeln wir spezielle Solarzellen, die trotz hoher Lichtintensität die Ladungsträger effizient trennen. Wir entwickeln außerdem Optiken (Fresnel-Linsen und Spiegel) für Konzentratormodule und bauen in unserem [Concentrator Technology Evaluation Center](#) (Con-TEC) Prototypen. Hybride Konzentratormodule erreichen Spitzenleistungen bis 350 Watt/m<sup>2</sup>. Unser Ziel ist, durch den Einsatz von Mikrooptiken und -zellen weitere Kostensenkungen zu erreichen und die Konzentrator-technologie zur Marktreife zu führen.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	46
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	15
 Vorträge und Konferenzbeiträge	26
 Neu erteilte Patente	2

## Ausgewählte Projekte 2021



[50Prozent/50Percent – Monolithische III-V-Mehrfachsolarzellen mit über 50 % Wirkungsgrad unter konzentrierter Einstrahlung](#)



[QuintuMod – Entwicklung eines kostengünstigen und gleichzeitig hocheffizienten Solarmoduls unter Verwendung einer 5fach-Stapelsolarzelle](#)



[PoTaSi – Demonstration des Potenzials von monolithischen Tandemsolarzellen aus III-V-Halbleitern und Silicium](#)



[micro-CPV – Entwicklung eines hochkonzentrierenden CPV-Moduls auf Basis modernster Micro-Fertigungstechnologie](#)



[H2Demo – Entwicklung von Demonstratoren zur direkten solaren Wasserspaltung](#)



[AIIR-Power – Verbundprojekt: Entwicklung von KI-Techniken zur Optimierung optoelektrischer Bauelementdesigns und ihrer epitaktischen Herstellung sowie deren Anwendung für Telekom-Wellenlängen](#)

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu diesem Geschäftsfeld



# Perowskit- und Organische Photovoltaik

---



**Die erreichten Fortschritte bringen uns unserem Ziel, neue Anwendungsfelder zu erschließen, deutlich näher.«**

**Dr. Uli Würfel**  
Abteilungsleiter  
Perowskit- und  
Organische Photovoltaik

## Position im Markt

Mit Perowskitsolarzellen konnten bereits sehr hohe Wirkungsgrade erzielt werden und es ist in naher Zukunft mit weiteren Steigerungen zu rechnen. Allerdings basieren die Rekordwirkungsgrade bisher auf Zellstapeln, die weniger langzeitstabil sind und zudem keine realistische Option für die Hochskalierung darstellen. Aus diesem Grund entwickelt das Fraunhofer ISE Zellkonzepte, die sowohl eine ausreichende Langzeitstabilität als auch eine entsprechende Hochskalierbarkeit gewährleisten und zudem niedrige Herstellungskosten ermöglichen.

Bei der organischen Photovoltaik konnte der Wirkungsgrad durch neuartige Absorbermaterialien deutlich erhöht werden und auch hier kann zukünftig von weiteren Verbesserungen ausgegangen werden. Am Fraunhofer ISE arbeiten wir daran, diese Verbesserungen auf die Rolle-zu-Rolle-Produktion flexibler Solarmodule zu übertragen. Erste Anwendungen ergeben sich bereits im Bereich des Internet of Things (IoT), bevor sich bei weiteren Steigerungen im Wirkungsgrad und der Langzeitstabilität zukünftige Anwendungsfelder wie die gebäudeintegrierte Photovoltaik und die Agri-Photovoltaik erschließen.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	35
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	15
 Vorträge und Konferenzbeiträge	17

## Ausgewählte Projekte 2021



[ORGANAUT – Organische Photovoltaik für autonome vernetzte Sensoren und IoT](#)



[UNIQUE – Carbon Based Perovskite Solar Cells with UNI-Directional Electron Bulk Transport: in the QUEst of a Short Time to Market](#)



[PeroTec – Skalierbare Perowskit-Technologie](#)



[APOLO – SmArt Designed Full Printed Flexible ROBust Efficient Organic HaLide PerOvskite solar cells](#)



[ADAPT – Klimaanpassung durch organische Agri-Photovoltaik](#)

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu diesem Geschäftsfeld



# Photovoltaische Module und Kraftwerke

---



**Vor uns liegen viele Jahre intensiven  
PV-Ausbaus, der Flächenverbrauch  
kann aber durch Integration über-  
schaubar bleiben.«**

**Dr. Harry Wirth**  
Bereichsleiter  
Photovoltaik, Module  
und Kraftwerke

## Position im Markt

Anspruchsvollere Klimaziele werden das Ausbautempo der Photovoltaik weiter beschleunigen, je nach Szenario sind alleine in Deutschland 12 bis 20 GW<sub>p</sub> pro Jahr notwendig. Mit der Integration von PV-Modulen in Agrar- und Wasserflächen, Gebäude- und Fahrzeughüllen, Parkplätze und Fahrwege können riesige Flächenpotenziale erschlossen werden. Diese Anwendungen benötigen hocheffiziente Module mit einem Produktdesign, das Synergien erzeugt und eine hohe Akzeptanz fördert.

Die wachsenden Waferformate und die Teilung der Solarzellen verlangen seitens der Modulhersteller einen schnellen Umstieg auf Vieldraht- oder Schindelverbindungen. Alle wichtigen Verbindungstechnologien können wir in unserem [Module Technology Evaluation Center](#) im industriellen Format abbilden. Die ebenfalls wachsenden Modulformate mit Leistungen über 500 W<sub>p</sub> und das hohe Innovationstempo stellen höchste Anforderungen an die Charakterisierung und Zuverlässigkeitsprüfung. Mit einer Messunsicherheit von 1,1 % bietet unser akkreditiertes Kalibrierlabor höchste Präzision.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	201
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	25
 Vorträge und Konferenzbeiträge	43
 Neu erteiltes Patent	1

## Ausgewählte Projekte 2021



[IEA PVPS Task 13 – Performance, Operation and Reliability of Photovoltaic Systems](#)



[APV Obstbau – Agri-Photovoltaik als Resilienzkonzept zur Anpassung an den Klimawandel im Obstbau](#)



[KoMoGER – Kompetitive Module »Made in Germany«](#)



[PVwins – Entwicklung von wandintegrierten PV-Elementen für den Lärmschutz](#)



[BALDACHIN – Entwicklung eines innovativen Solardachelements – kostengünstig, schön und einfach zu installieren](#)



[OptOM – Kostenoptimale Betriebsführung von PV-Anlagen über ihre wirtschaftliche Lebensdauer](#)



[Shirkan – Matrix-Schindel-PV-Modul – robust, kostengünstig, ästhetisch und hocheffizient](#)



[SOLREV – Solare Ressourcen und Vorhersagen für die Netz- und Marktintegration von Solarenergie](#)

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu diesem Geschäftsfeld



# Energieeffiziente Gebäude

---



**Die Wärmewende stellt insbesondere im Bestand eine Herausforderung dar. Ein Energieträgerwechsel von fossilen Brennstoffen zu Strom ist zentraler Teil der Lösung.«**

**Dr. Peter Schossig**  
Bereichsleiter  
Energieeffiziente Gebäude

## Position im Markt

Der Gebäudesektor ist der einzige Sektor, der 2020 die Klimaschutzziele verfehlt hat. Die Ursachen sind vielfältig: Eine große Bandbreite an Akteuren, der Fachkräftemangel, besonders im Sanitär-, Heizungs- und Klimahandwerk, sowie relativ hohe CO<sub>2</sub>-Vermeidungskosten spielen dabei eine Rolle. Die Herausforderung besteht darin, hierfür Lösungsansätze bereitzustellen: Technologien für die nicht fossile Wärmeerzeugung, Transformationskonzepte für die Wohnungswirtschaft und Industriebetriebe, die Schaffung neuer Kapazitäten im Handwerk und die Umstellung auf grüne Fernwärme.

Die aktuellen Diskussionen um geeignete Kältemittel werden auch für Wärmepumpen größerer Leistungsklassen von Bedeutung sein. Mit dem Aufbau des **KETEC**, einer neuen Forschungsplattform für die Kältetechnik, an deren Aufbau wir mitwirken, werden hierfür neue FuE-Kapazitäten geschaffen. Im Verbund mit weiteren Fraunhofer-Instituten wurde das Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems (CINES) um das Themenfeld Wärme erweitert, um besonders die Transformation der Fernwärme wissenschaftlich zu begleiten.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	158
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	24
 Vorträge und Konferenzbeiträge	24
 Neu erteilte Patente	5

## Ausgewählte Projekte 2021

-  [Smartes Quartier Durlach – Verbundvorhaben: EnEff:Stadt – KA-Durlach: Smartes Quartier Karlsruhe-Durlach](#)
-  [SCOPE – Projektdatenumgebung und Modellierung multifunktionaler Bauprodukte mit Fokus auf die Gebäudehülle](#)
-  [DiBesAnSHK – Digitalisierung der Bestandsaufnahme und Angebotserstellung im SHK-Handwerk](#)
-  [LC 150 – Entwicklung eines kältemittelreduzierten Wärmepumpenmoduls mit Propan](#)
-  [Farbkollektor – Konzepte für architektonisch angepasste Kollektoren für den Altbaubestand und Neubauten](#)
-  [Reallabor Großwärmepumpen – Reallabore der Energiewende](#)
-  [HEAVEN – Modulierende Sole-Wärmepumpe mit Mehrquellensystem und dezentrale Lüftungsanlagen](#)
-  [WAMS – Wärmepumpen – Akustik und Mehrquellensysteme](#)

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu diesem Geschäftsfeld



# Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse

---



**Effiziente, kostengünstige und kompakte Wärme- und Kältespeicher sind zentrale Komponenten für die Wärmewende, Sektorenkopplung und Transformation der Industrie.«**

**Dr. Peter Nitz**  
Abteilungsleiter  
Solarthermische Kraftwerke  
und Industrieprozesse

## Position im Markt

Hochtemperatur-Solarwärme lässt sich kostengünstig speichern. So kann sie jederzeit bedarfsgerecht in solarthermischen Kraftwerken Strom erzeugen oder industrielle Prozesse antreiben. Trotz dieser Vorteile ist die Technologie noch vergleichsweise wenig verbreitet. Mit unserer Forschung wollen wir durch eine Kostensenkung der Solarwärme und ihrer Speicherung zu ihrem breiteren Einsatz beitragen. Für die Transformation hin zu einer CO<sub>2</sub>-armen Industrie werden in Zukunft verschiedene Technologien zur Bereitstellung von Energie bzw. Wärme kombiniert zum Einsatz kommen. Gemeinsam mit Effizienzmaßnahmen und Abwärmenutzung können etwa große Hochtemperatur-Wärmepumpen zuverlässig industrielle Wärme bereitstellen. Dabei hat die Verknüpfung von Wärmepumpen – mit erneuerbarem Strom betrieben – und Solarthermie das Potenzial, Wärme vollständig erneuerbar bereitzustellen. Eine zentrale Komponente für eine solche Hybridisierung sind Wärme- und Kältespeicher.

Über die Energieversorgung hinaus ist die Ressourceneffizienz ein zentrales Zukunftsthema. Hierfür entwickeln wir Membranverfahren für die Entsalzung und Rückgewinnung von Wertstoffen aus industriellen Abwässern sowie zur Gewinnung wertvoller Rohstoffe aus geothermalen Solen.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	60
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	9
 Vorträge und Konferenzbeiträge	9
 Neu erteilte Patente	5

## Ausgewählte Projekte 2021



[AVUSpro – Automatisierte in situ Messung von Verschmutzung zur Standortbewertung und im Betrieb solarthermischer Kraftwerke](#)



[FENOPTHEs – Füllkörperentwicklung und -optimierung für thermische Speicher](#)



[HelioGLOW – Entwicklung von Komponenten für ein solarthermisches Turmkraftwerk](#)



[HelioSense – Entwicklung eines innovativen 3D-Laser-Verschmutzungsscanners für den autonomen Einsatz in solarthermischen Kraftwerken](#)



[KOKAP – Kosteneffiziente Kapseltechnologien für Phasenwechselmaterialien](#)



[Modulus – Modulare Leistungsübergabestation](#)



[Optimus – Entwicklung, Optimierung und Anwendung von PCM-Emulsionen mit hoher thermischer Speicherdichte](#)

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu diesem Geschäftsfeld



# Wasserstofftechnologien und Elektrische Energiespeicher

---



**Wasserstoff ist die energetische Unabhängigkeitserklärung vom fossilen Zeitalter und der dadurch verursachten Klimakrise.«**

**Prof. Dr. Christopher Hebling**  
Bereichsleiter  
Wasserstofftechnologien  
und Elektrische Energiespeicher

## Position im Markt

Die Transformation hin zu einem defossilisierten, globalen Energiesystem geschieht durch einen Mix aus heimisch genutzten erneuerbaren Energien sowie der Erzeugung und dem anschließenden Transport von nachhaltigen, stofflichen Energieträgern aus sonnen- und windreichen Regionen. Wir begleiten diesen Prozess durch die Erstellung von Technologie- und Systemstudien sowie ökonomischen Bewertungen – wie z. B. in den Projekten [HySupply](#) oder [HyPat](#). Weiterhin entwickeln wir durch intensive Charakterisierung und Modellierung ein tiefes Verständnis für die Prozesse in einer Membran-Elektroden-Einheit von PEM-Brennstoffzellen bzw. PEM-Elektrolyseuren und forschen an automatisierten Verfahren für deren industrielle Fertigung.

Batterien gewinnen beim Ausbau der fluktuierenden erneuerbaren Energien rasant an Bedeutung und bilden als hoch-effiziente mobile Speicher das Fundament einer erfolgreichen Verkehrswende. Wir forschen entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Batteriematerialien und -zellen über die Batteriesystemtechnik und das Testen bis hin zu den vielfältigen Anwendungen von Batteriespeichern.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	208
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	24
 Vorträge und Konferenzbeiträge	43
 Neu erteilte Patente	5

## Ausgewählte Projekte 2021

-  [HyFab-BW – HyFab-Baden-Württemberg –  
Forschungsfabrik für Wasserstoff und  
Brennstoffzellen, Teil 2](#)
-  [Prometheus – Protonen-Austausch-Membran  
Elektrolyseurkonzept für erhöhte Temperatu-  
ren und Druckzustände](#)
-  [StoRelH2 – Storage/Release H2 – Effiziente  
und kostengünstige Wasserstoffversorgung  
mit flüssigen organischen Wasserstoffträgern](#)
-  [PLöPSS – Entwicklung von passiven Lösungen  
zur Hemmung der Propagation in stationären  
Speichersystemen](#)
-  [OrtOptZelle – Ortsabhängige Kompression  
von Pouchzellen zur Lebensdaueroptimierung](#)
-  [FLiBatt – Feste Lithiumbatterien mit  
Vliesstoffen](#)
-  [BetterBat – Bewertung der technischen  
und systemischen Passfähigkeit von Bat-  
terietechnologien für batterierelevante  
Anwendungen](#)

Mehr Informationen zu  
diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu  
diesem Geschäftsfeld



# Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme

---



**Ein erneuerbares Energiesystem  
erfordert ein intelligentes Strom-  
netz mit leistungselektronischen  
Umrichtern.«**

**Prof. Dr. Christof Wittwer**  
Bereichsleiter  
Leistungselektronik, Netze  
und Intelligente Systeme

## Position im Markt

Im Geschäftsfeld »Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme« befassen wir uns mit innovativen Technologien zur Transformation des elektrischen Energiesystems. Wir bieten Studien im Bereich der Energiesystemanalyse an, um Technologietrends und kostenoptimale Transformationsoptionen von nachhaltigen Energieversorgungssystemen zu identifizieren.

Aufgrund der zunehmenden Kopplung der Sektoren Elektrizität, Wärme und Mobilität und der damit verbundenen Elektrifizierung der Sektoren gewinnt die Ausgestaltung des Stromnetzes an Bedeutung. Die Netzplanung des zukünftigen Stromnetzes erforschen wir mit eigenen Simulationsmodellen und einem Hardware-in-the-Loop-Labor, das die Erprobung von neuen Steuerungssystemen für die Netzintegration ermöglicht. Die Entwicklung von hocheffizienter, langlebiger und netzdienlicher Leistungselektronik ist ein zentraler Schwerpunkt unseres Forschungsprofils. Wir arbeiten an Mittelspannungsleistungselektronik, Hochleistungsumrichtern und netzbildenden Wechselrichtern, die künftig die nachhaltige Versorgung ohne fossile Energie ermöglichen.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	156
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	17
 Vorträge und Konferenzbeiträge	31

## Ausgewählte Projekte 2021



[HYBAT – Hybride Lithium-Ionen-Batterie-speicherlösung mit 1500 V-Systemtechnik, innovativem Thermomanagement und optimierender Betriebsführung](#)



[Kopernikus-Ariadne – Evidenzbasiertes Assessment für die Gestaltung der deutschen Energiewende](#)



[BKM 2.0 – Analyse der Peer-2-Peer-Vermarktung von Strom und Entwicklung eines Bilanzkreismanagements 2.0](#)



[LamA-connect – BSI-konformes Laden mithilfe von Smart Meter Gateways](#)



[EnStadt:Pfaff – Dezentrales Energiemanagement vom Smart Home bis ins Quartier](#)



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



[StraZNP – Strategische Zielnetzplanung](#)

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu diesem Geschäftsfeld



# Das Fraunhofer ISE – ein zuverlässiger Partner

## Forschung im Auftrag unserer Kunden

Forschung im Auftrag von Kunden aus Wirtschaft, Wissenschaft und Politik ist das primäre Tätigkeitsfeld des Fraunhofer ISE. Dabei arbeiten wir mit ebenso zahlreichen wie unterschiedlichen Projektpartnern zusammen. Für kleine und mittlere Unternehmen ersetzen wir mitunter die eigene Forschungsabteilung. Großkonzerne profitieren von unserem spezifischen Know-how und unserer hervorragenden technischen Ausstattung. Wir beraten aber auch Städte, Kommunen und Bildungseinrichtungen und führen beispielsweise Machbarkeitsstudien und Modellierungen durch. So sind wir je nach den Anforderungen unserer Kunden in der Lage, passgenaue Lösungen zu entwickeln.

Im Zentrum stehen dabei vertraglich vereinbarte Forschungs- und Entwicklungsprojekte mit unseren Partnern aus Wirtschaft und Forschung. Als größtes Solarforschungsinstitut in Europa sind wir zudem in der Branche, in Politik und Verbänden gut vernetzt, sodass unsere Kunden auch über strategische Partnerschaften und Innovationscluster von der Zusammenarbeit mit uns profitieren.

## Von der ersten Idee zum marktreifen Produkt

Das Fraunhofer ISE begleitet seine Projektpartner mit seinem breiten Kompetenzspektrum je nach Bedarf von der ersten Idee bis zum marktreifen Produkt. Gemeinsam mit unseren Kunden forschen wir an neuen Materialien und Komponenten, erarbeiten neue Methoden, erstellen Simulationen und Modellierungen und führen dazu Proofs of Principle durch.

Wir entwickeln Prototypen und Kleinserien von neuen Komponenten und Geräten, übertragen die Herstellungsverfahren in den Produktionsmaßstab und führen messtechnische Analysen und Proofs of Concept durch. Auch bei der Markteinführung unterstützen wir unsere Kunden. Wir stehen ihnen in Planungsprozessen beratend zur Seite, fertigen Studien an und beleuchten mögliche Systemdesigns. Über unsere akkreditierten Labors führen wir zudem forschungsbegleitende Prüfungs- und Zertifizierungsleistungen durch, die die Marktzulassung ihrer Produkte garantieren. Im Feld bieten wir Monitoring und Qualitätssicherung für Geräte und Anlagen an.



*Leistungsspektrum des  
Fraunhofer ISE im Überblick.*



## Expertise und Erfahrung

Nach über vierzig Jahren Forschung und Entwicklung verfügt das Fraunhofer ISE über profunde Marktkenntnis und außerordentliches fachliches Know-how. Ein wichtiger Vorteil des Instituts ist auch die erstklassige technische Infrastruktur. Auf über 20900 m<sup>2</sup> stehen unseren Kunden modernste Labors und Anlagen über die ganze Bandbreite unserer Geschäftsfelder zur Verfügung.

Für die erfolgreiche Durchführung von FuE-Projekten ist neben der fachlichen Kompetenz auch zielorientiertes Arbeiten und zuverlässiges Projektmanagement mit eingespielten Prozessen erforderlich. Garantierte Vertraulichkeit und professionelle Vereinbarungen hinsichtlich der Nutzungsrechte von Patenten und Lizenzen sind für uns dabei selbstverständlich.

## Erhebungen zur Kundenzufriedenheit

Um uns stets optimal an den Anforderungen des Marktes auszurichten, ist uns die Qualitätssicherung unserer Arbeit ein wichtiges Anliegen. Dazu führen wir jedes Jahr externe Audits durch. Zudem befragen wir regelmäßig unsere Kunden. Wir sind stolz darauf, und es ist uns ein Ansporn, stets hohe Zufriedenheitswerte von unseren Projektpartnern widergespiegelt zu bekommen. Wir freuen uns auch über das hohe Maß an Wiederbeauftragungen und die dadurch entstehenden langjährigen, vertrauensvollen Kooperationen mit unseren Auftraggebern.

**»Vierzig Jahre waren unser Geschick und das Geschick des Fraunhofer ISE sehr, sehr eng verbunden. Ich freue mich, auch in den nächsten Jahren vertrauensvoll mit dem Fraunhofer ISE zusammenarbeiten zu können, viele gemeinsame Weltrekorde zu entwickeln und von den Mitarbeitern und der Infrastruktur auch als Industrieunternehmen weiter profitieren zu können.«**

Jürgen Heizmann  
CEO AZUR SPACE Solar Power GmbH

**»Das Fraunhofer ISE hat uns in unserer Brennstoffzellenentwicklung hervorragend durch hochwertige Langzeittests unterstützt. Besonders schätzen wir die langjährige und fundierte Expertise der Wissenschaftler.«**

Dr. Florian Henkel  
Bauteil-Verantwortlicher Stack Assembly  
Module, cellcentric GmbH & Co. KG,  
a Daimler Truck & Volvo group company

**»Wir freuen uns über die gelungene Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE, weil unsere Anliegen schnell und engagiert umgesetzt wurden. Das war die Basis für ein erfolgreiches Projekt.«**

Volker Büge und Hellmuth Frey  
EnBW Energie Baden-Württemberg AG

**»Für die Wohnungswirtschaft sind klimaneutrale und bezahlbare Wohnungen wichtiges Anliegen – und große Herausforderung. Unterstützung des Fraunhofer ISE ist hier sehr willkommen«**

Dr. Ingrid Vogler  
Referentin für Energie, Technik, Normung,  
GdW Bundesverband deutscher Wohnungs-  
und Immobilienunternehmen e.V.

# FuE-Infrastruktur

Das Fraunhofer ISE verfügt über eine hervorragende technische Infrastruktur. 20 900 m<sup>2</sup> Laborfläche – darunter 1 070 m<sup>2</sup> Reinraumfläche – sowie hochmoderne Geräte und Anlagen bilden die Grundlage unserer Forschungs- und Entwicklungskompetenzen. Unser Ziel ist es, zukunftsweisende technologische Lösungen zu finden und diese in Wirtschaft und Gesellschaft zu transferieren. Unsere Partner aus der Industrie profitieren dabei vom Know-how unserer Mitarbeiter und Mitarbeiterinnen ebenso wie von dem kontinuierlichen Ausbau unserer technischen Infrastruktur. Besonders kleine und mittelständische Unternehmen ohne eigene FuE-Abteilung erhalten durch die Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer ISE Zugang zu einer hochleistungsfähigen Laborinfrastruktur und exzellenten Forschungsleistungen.

In seinen sieben akkreditierten Labors bietet das Fraunhofer ISE Unternehmen und wissenschaftlichen Einrichtungen verschiedene Prüf- und Zertifizierungsverfahren an. Derzeit verfügen wir über zwei Kalibrier- und fünf Testeinrichtungen mit modernster Ausstattung und Akkreditierung durch die Deutsche Akkreditierungsstelle DAkkS ([Seite 46 ff](#)).

In unseren acht Laborzentren und vier produktionsnahen Technologie-Evaluationszentren entwickeln wir neue Produkte, Verfahren und Dienstleistungen und optimieren bestehende. Im April 2021 haben wir unsere jüngste Einrichtung eingeweiht: das Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen ([Seite 50](#)).

## 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





## Laborzentren

Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen



Zentrum für Optik und Oberflächenforschung



Zentrum für Materialcharakterisierung  
und Gebrauchsdaueranalyse



Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien



Zentrum für elektrische Energiespeicher



Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen  
und synthetische Kraftstoffe



Zentrum für Leistungselektronik und  
nachhaltige Netze



Zentrum für neuartige PV-Technologien



*Durchlauf-Ätzanlage im PV-TEC Front End  
zur ozonbasierten Waferreinigung sowie  
einseitigen Emitterentfernung.*

# Akkreditierte Labors

---

**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

[cells@callab.de](mailto:cells@callab.de)

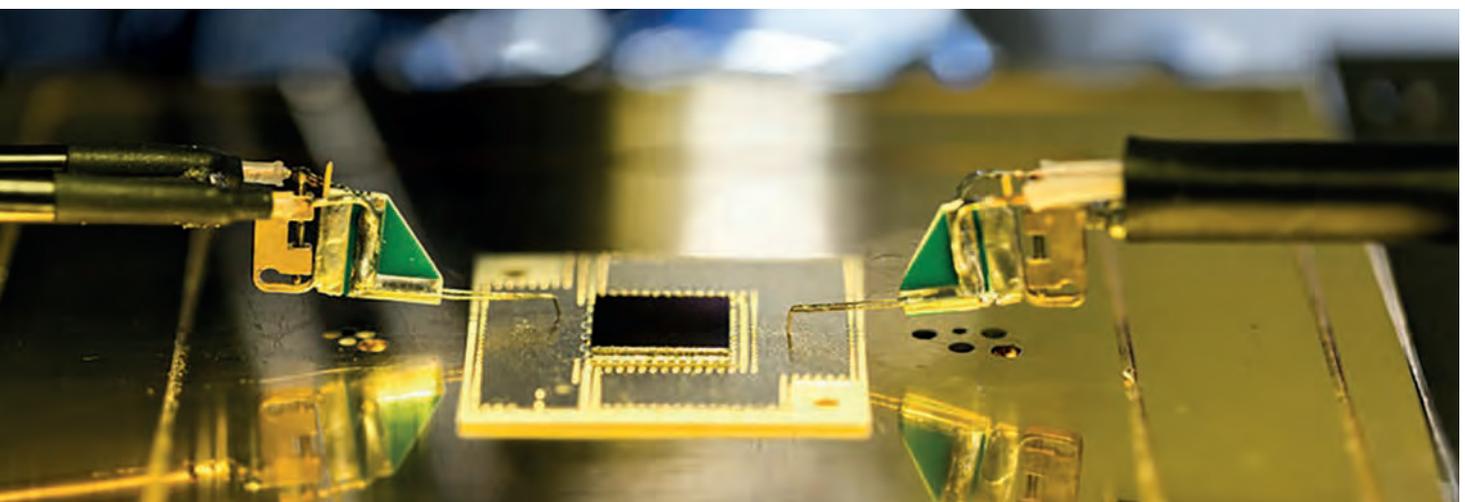
*Photovoltaische Laserleistungszelle (10 x 10 mm<sup>2</sup>) zur Wandlung von Laserlicht in elektrische Leistung.*

## Kalibrierung von Solarzellen

Im [Callab PV Cells](#) bieten wir die Kalibrierung von Solarzellen verschiedenster PV-Technologien an. Es ist bei der Deutschen Akkreditierungsstelle DAkkS akkreditiert und zählt zu den weltweit führenden PV-Kalibrierlabors. In Kooperation mit Photovoltaikherstellern und mit Unterstützung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) arbeiten wir an der kontinuierlichen Verbesserung von Messunsicherheiten und entwickeln Methoden zur präzisen Messung neuer Solarzellentechnologien.

Wir können bifaziale Solarzellen sowohl mit beidseitiger als auch mit einseitiger Beleuchtung präzise vermessen. Unsere Kunden profitieren dabei von der Weiterentwicklung unserer Messplätze, die eine sehr hohe Präzision bei kurzer Messzeit ermöglichen. Darüber hinaus führen wir mit verschiedenen Mehrlichtquellensimulatoren Messungen von Mehrfachsolarzellen unter nahezu beliebigen Normbedingungen – z. B. auch für Weltraum- und für Konzentratoranwendungen – durch.

In einem neuen Arbeitsgebiet beschäftigen wir uns mit der Vermessung von Laserleistungssolarzellen, besonders mit Zellen, die aus identischen monolithischen Zellstapeln von bis zu zwölf 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.





## Kalibrierung und Performance-Tests von PV-Modulen

Im [Callab PV Modules](#) führen wir schnell und zuverlässig präziseste Kalibrierungen von PV-Modulen für Produktionslinien durch. Mit dem weltweiten Spitzenwert von 1,1 % Messunsicherheit, bestätigt von der Deutschen Akkreditierungsstelle (DAkkS), kalibrieren wir Referenzobjekte für Modulhersteller und bilden damit das Bezugsnormal für Produktionsmengen im GW-Maßstab. Unsere Kalibrierscheine und Kalibriermarken auf den Modulen stehen für höchste Präzision und Qualität.

Hocheffiziente Zelltechnologien wie PERC, TOPCon und HJT finden sich bei fast allen Modulherstellern im Sortiment, 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. Aktuell kommen vermehrt großformatige Module mit Leistungen über 500 Watt auf den Markt. Wir bieten die akkreditierte Kalibrierung auch für diese Formate.

Zudem entwickeln wir bereits heute Methoden zur Charakterisierung von Modulen, die auf Basis hocheffizienter Zelltechnologien künftiger Generationen aufgebaut sind, wie Perowskit-Silicium-Tandemzellen.

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

Martin Kaiser, B. Sc.  
Telefon +49 761 4588-5786

[modules@callab.de](mailto:modules@callab.de)



*Bifaziales PV-Modul im Callab PV Modules.*

## Qualitätssicherung von PV-Modulen

Das [TestLab PV Modules](#) prüft die Qualität und Zuverlässigkeit von PV-Modulen. In unserem akkreditierten Labor betreiben wir moderne und innovative Anlagen, deren Anwendungsspektrum deutlich über die Standardprüfungen hinausreicht.

Wir beraten unsere Kunden zu kosten- und zeiteffizienten Prüfprogrammen und individuellen Qualitätskriterien. Gemeinsam mit unserem Partner VDE bieten wir die Produktzertifizierung nach internationalen Standards an.

Aktuell besteht eine sehr große Dynamik im Bereich neuer Zell- und Modulkonzepte. Module werden leistungsfähiger und größer und die Vielfalt der Zell- und Verschaltungskonzepte nimmt zu. Geteilte Zellen, Schindeltechnik mit und ohne Verbinder sowie Multiwire- und Tandemtechnologien sind hierbei besonders hervorzuheben. Auch die Anwendungsgebiete entwickeln sich stetig weiter: Gebäude- oder Fahrzeugintegration verlangen nach neuen Rahmenbedingungen für die Modulprüfungen. So sind beispielsweise die Vorgaben in existierenden Standards zur Prüfung solcher Module oft noch nicht eindeutig. Wir untersuchen daher frühzeitig die Anwendbarkeit von Prüf- und Messverfahren für diese Technologien und entwickeln angepasste Methoden. Dabei verfolgen wir das Ziel höchster Präzision und Praxisrelevanz. Unsere Erfahrungen und Ergebnisse bringen wir in internationale Normungsgremien ein.



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

[tlpv@ise.fraunhofer.de](mailto:tlpv@ise.fraunhofer.de)

*Klimakammer für verschiedene Tests gemäß IEC 61215.*



## TestLab Solar Façades



### Charakterisierung von Fassaden und Bauteilen

Im [TestLab Solar Façades](#) charakterisieren wir transparente, transluzente und opake Materialien, prüfen Fassadenbauteile und bewerten die energetischen, thermischen und optischen Eigenschaften kompletter Fassaden. Dabei geht es sowohl um »passive« Fassadenbauteile als auch um »aktive« Fassadenkomponenten, die Sonnenenergie in Strom oder Wärme umwandeln.

Das TestLab ist für die messtechnische und rechnerische Prüfung von Transmission, Reflexion, g-Wert und U-Wert akkreditiert. Es ist auf Objekte spezialisiert, die mit herkömmlichen Prüfmethode oft nur unzureichend charakterisiert werden können, wie Bauteile mit winkel- und polarisationsabhängigem Verhalten, lichtstreuenden Materialien oder strukturierten und lichtlenkenden Elementen.

Wir verfügen über umfangreiche Erfahrung im Bereich der Sonnenschutzsysteme, der bauwerkintegrierten Photovoltaik (BIPV) und der bauwerkintegrierten Solarthermie (BIST). Für die Bewertung von Tageslichtnutzung und Blendung setzen wir in unseren Simulationsprogrammen goniometrisch ermittelte BSDF-Datensets (Bi-Directional Scattering Distribution Function) ein.

Zudem ist das TestLab Solar Façades als notifizierte Prüfstelle anerkannt und somit für die Prüfung von Bauprodukten im Bereich Energieeinsparung zugelassen. Es ist der europäische Regional Data Aggregator (RDA) für das [National Fenestration Rating Council \(NFRC\)](#) und berät europäische Verglasungshersteller, die mit ihren Produkten den nordamerikanischen Markt adressieren.

Dr. Bruno Bueno  
Telefon +49 761 4588-5377

[testlab-solarfacades@ise.fraunhofer.de](mailto:testlab-solarfacades@ise.fraunhofer.de)

*Versuchsraum am  
Fraunhofer ISE zur  
Bewertung des visu-  
ellen Komforts von  
Fassadentechnologien.*



*Testung eines Solarkollektors  
auf mechanische Sog- und  
Druckfestigkeit im TestLab  
Solar Thermal Systems.*



## TestLab Solar Thermal Systems



### Prüfung von Kollektoren, Speichern und Systemen

Das Leistungsangebot des akkreditierten [TestLab Solar Thermal Systems](#) umfasst die Prüfung für die Marktzulassung und Zertifizierung von solarthermischen Kollektoren und Wärmespeichern sowie von Heizungs-, Lüftungs- und Klimasystemen und deren Komponenten. Für Solarluftkollektoren sind wir der weltweit einzige akkreditierte Anbieter für die vollumfängliche Prüfung nach ISO 9806:2017. Durch die Zusammenarbeit mit dem akkreditierten TestLab PV Modules sind wir zudem in der Lage, diese Dienstleistungen auch für PVT-Kollektoren anzubieten. Bei der Prüfung hybrider Heizungssysteme arbeiten wir mit dem akkreditierten TestLab Heat Pumps and Chillers zusammen.

Unser Indoor-Solarsimulator liefert beste Wiederholgenauigkeit, was besonders im Entwicklungskontext von Bedeutung ist. Unsere Outdoor-Teststände sind sowohl auf die Prüfung von Großflächenkollektoren als auch konzentrierende Kollektoren ausgelegt. Die mechanische Widerstandsfähigkeit von Montagesystemen, PV-Modulen und Solarthermiekollektoren prüfen wir individuell und zusätzlich zu den normativen Testbedingungen je nach Kundenbedarf in Temperaturbereichen von -40 °C bis +90 °C. Mit der in situ Charakterisierung können wir auch im Feld Anlagen für unsere Kunden vermessen. Im Rahmen des Zertifikats »Solar Keymark« führen wir außerdem weltweit Werksinspektionen, auch im Remote-Verfahren, durch.

#### Kollektoren

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

#### Speicher, Systeme

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

#### in situ Vermessung

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

[testlab-sts@ise.fraunhofer.de](mailto:testlab-sts@ise.fraunhofer.de)



## Vermessung und Prüfung von Wärmepumpen und Kältemaschinen

Im [TestLab Heat Pumps and Chillers](#) entwickeln, vermessen und charakterisieren wir Wärmepumpen und Kältemaschinen sowie deren Komponenten. Das modulare Prüfstandkonzept ermöglicht Tests verschiedener Technologien und Systemkonfigurationen unter Betriebsbedingungen mit verschiedenen Wärmeträgermedien (Luft, Wasser, Sole). Neben Anlagen mit einem elektrischen Antrieb können auch thermisch (mit Wärme, Erd- oder Prüfgas) angetriebene Geräte vermessen werden. Das Labor verfügt über ein integrales Sicherheitskonzept, das die Vermessung von Komponenten und Systemen mit brennbaren Kältemitteln oder Ammoniak erlaubt.

In einer kalorimetrischen Doppelklimakammer vermessen wir Prüflinge bis zu 100 kW Wärme- oder Kälteleistung bei Temperaturen von -25 °C bis +50 °C und relativen Luftfeuchten von 25 % bis 95 %. Für die Konditionierung von Wasser oder Sole stehen mehrere Anlagen zur 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 5 000 m<sup>3</sup>/h) im Temperaturbereich von -15 °C bis +50 °C bei relativer Luftfeuchtigkeit von 15 % bis 95 % konditioniert werden.

In unserem nach ISO/IEC 17025 akkreditierten Labor prüfen wir Anlagen nach allen gängigen Normen und Regelwerken. Über die standardisierten Methoden hinaus entwickeln wir für unsere Kunden individuelle, realitätsnahe Messverfahren.

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

[testlab-heatpumps@ise.fraunhofer.de](mailto:testlab-heatpumps@ise.fraunhofer.de)



*Messung der Lufttemperatur und -feuchte am Auslass einer außen aufgestellten Wärmepumpe.*

## Charakterisierung leistungselektronischer Geräte

Das akkreditierte [TestLab Power Electronics](#) bietet die Prüfung von elektrischen Einheiten und Anlagen im Leistungsbereich bis ca. 10 Megawatt an. Es kann auf die umfangreiche Ausstattung des »Zentrums für Leistungselektronik und nachhaltige Netze« zurückgreifen und profitiert vom eigenen Anschluss ans 110-kV-Netz.

Die Laborausstattung 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 Batteriewechselrichter, aber auch Verbrennungskraftmaschinen wie BHKWs sowie Lasten, wie etwa Schnellladesysteme für die Elektromobilität. Es stehen verschiedene Transformatoren, Prüfeinrichtungen zur Simulation von Netzfehlern (bis 10 MVA), Netzsimulatoren (bis 1 MVA), DC-Quellen (je 1 MW), Schutzprüfgeräte sowie eine Schwingkreistesteinrichtung für Anti-Islanding-Tests (400 kVA) zur Verfügung.

Darüber hinaus bieten wir unseren Kunden Vermessungen im Feld, etwa in großen PV-Kraftwerken oder Windparks, an. Hierfür verfügen wir über sechs Leistungsmesssysteme mit je 16 Messkanälen, die wir räumlich verteilt anordnen und synchronisieren können.

Wir prüfen Erzeugungseinheiten nach internationalen Einspeiserichtlinien (z. B. für Deutschland, China, Großbritannien) und bestimmen hochgenau den Wirkungsgrad leistungselektronischer Geräte.



Steffen Eyhorn  
Telefon +49 761 4588-5957

[testlab-pe@ise.fraunhofer.de](mailto:testlab-pe@ise.fraunhofer.de)

*Mittelspannungsschaltanlage im Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze.*



# Das neue Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen

## Kontakt

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



**Wir stehen am Beginn einer solaren Revolution. Und mitten-drin das Fraunhofer ISE, eines der wichtigsten Solarforschungszentren der Welt.«**

**Winfried Kretschmann**

Ministerpräsident von Baden-Württemberg  
anlässlich der Einweihung des Zentrums  
für höchsteffiziente Solarzellen im April 2021

*Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen:  
Blick entlang des Reinraumflurs. Im  
hinteren Teil ist der Photolithographie-  
Bereich zu sehen.*



Weitere  
Informationen

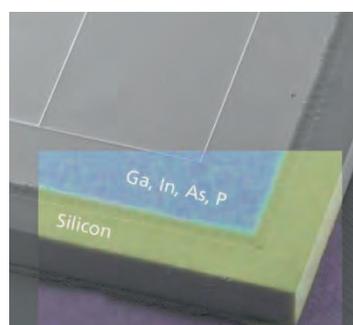


Am 27. April 2021 fiel der offizielle Startschuss für unser neues Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen. Unter Teilnahme des Ministerpräsidenten des Landes Baden-Württemberg, Winfried Kretschmann, und anderer Ehrengäste fand die Einweihung unseres Laborgebäudes statt, das aus Mitteln des Bundes und des Landes Baden-Württemberg finanziert wurde.

Wir blicken auf eine sehr gelungene Veranstaltung zurück – mit motivierenden [Grüßworten und Reden](#), über die wir uns sehr gefreut haben. Aufgrund der pandemischen Rahmenbedingungen war leider nur eine Online-Veranstaltung möglich. Dies tat zwar der guten Atmosphäre keinen Abbruch, leider konnten wir aber so den Hauptakteur des Tages, nämlich unser neues Laborgebäude, nicht live präsentieren – was sich zweifelsohne gelohnt hätte: Auf mehr als 1080 m<sup>2</sup> modernster Laborfläche, davon 740 m<sup>2</sup> Reinraum, können wir im neuen Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen fortschrittliche PV-Technologien testen und optimieren. Die Forschungsinfrastruktur lässt das Herz einer jeden Solarforscherin und eines jeden Solarforschers höherschlagen:

- Hochtemperaturprozesse (BBr<sub>3</sub>, POCl<sub>3</sub>, O<sub>2</sub>)
- Ionenimplantation (P, B, H, Ga, Si)
- Nasschemische Prozesse zur Reinigung und Strukturierung von Si- oder III-V-Wafern
- Gelblichtbereich für Photo- und Laserlithographie zur Erzeugung von Mikrostrukturen
- Waferbonding-Technologie
- Plasmatechnologie (PECVD- und LPCVD-Abscheidung und Plasmaätzen)
- Atomlagenabscheidung (ALD) zur Abscheidung von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>x</sub>, ITO, TCOs etc.
- Bearbeitung von flexiblen Wafergrößen bis zu M4 (162 x 162 mm<sup>2</sup>)
- Aufdampfanlagen zur Beschichtung mit Metallen und dielektrischen Schichten
- Galvanische Kontaktierung von Solarzellen
- Umfangreiche Ausrüstung zur Material- und Bauelementcharakterisierung

Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme einer III-V-Silicium-Tandemsolarzelle.

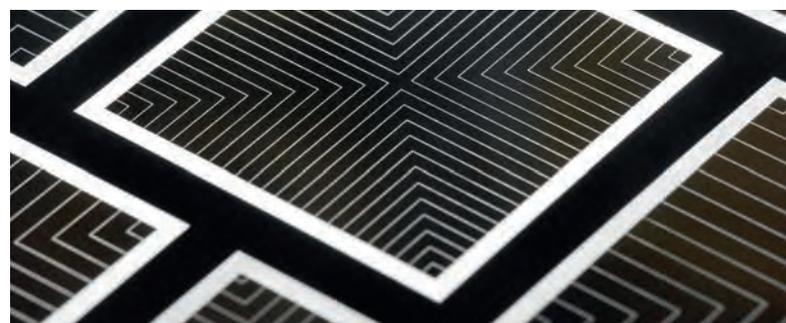


Das Laborzentrum bietet uns optimale Möglichkeiten, Solarzellen aus Silicium und III-V-Halbleitern auf ein neues Niveau zu heben. Im Bereich der höchsteffizienten Solarzellen hält das Fraunhofer ISE mehrere Weltrekorde, etwa für beidseitig kontaktierte Siliciumsolarzellen (26,0 %). Auch die weltweit besten monolithischen Vierfachsolarzellen (46,1 %) unter konzentriertem Licht wurden hier hergestellt. Solche Spitzenwerte sind nur unter optimalen Bedingungen und mit bester Laborausstattung zu erzielen. Sie bilden die Speerspitze der Solarzellenentwicklung und sind gleichzeitig Inspiration für die industrielle Umsetzung neuer Solarzellentypen, die wir intensiv in unserer Photovoltaik-Pilotlinie PV-TEC entwickeln.

Neben der Weiterentwicklung der Silicium- und III-V-Technologien liegt ein Fokus des neuen Labors auf der Kombination dieser beiden Materialien in Form von Tandemsolarzellen ([Seiten 24/25](#)). Höchsteffiziente siliciumbasierte Tandemzellen zählen zu den vielversprechendsten Zukunftstechnologien der Photovoltaik und finden sich auf den Roadmaps aller relevanten Akteure der PV-Industrie. Wir entwickeln sowohl siliciumbasierte Tandemsolarzellen aus Kombinationen aus Silicium und III-V-Halbleitern als auch Silicium und Perowskiten. Dabei beschränken wir uns nicht auf die reine Tandemsolarzelle, sondern entwickeln diese neue Technologie dank unserer breit gefächerten Expertise vom Material bis zum Modul.

Das neue Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen bildet einen neuen wichtigen Baustein der Photovoltaikforschung am Fraunhofer ISE. Es erlaubt uns, auch in Zukunft wegweisende neue Solarzellentypen, Prozesse und Technologien zu entwickeln und so zur Wettbewerbsfähigkeit der deutschen PV-Industrie beizutragen.

*Die TOPCoRE-Solarzelle erzielte mit 26 % Wirkungsgrad einen neuen Weltrekord für beidseitig kontaktierte Solarzellen.*



# Highlights unserer Forschung

---





**Unsere fachliche Breite ermöglicht uns und unseren Kunden, die Energiewende in ihrer Gesamtheit mitzugestalten.«**

Prof. Dr. Hans-Martin Henning, Prof. Dr. Andreas Bett  
Institutsleiter Fraunhofer ISE

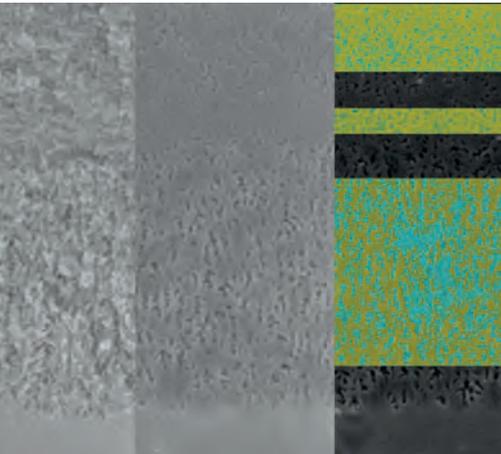
# Inhalt

---

Wiederverwendbare Wachstumsvorlagen durch elektrochemisches Ätzen von porösen Schichtstapeln .....	56
Inline-Reflexionsspektroskopie zur Inspektion poröser Siliciumschichten für die epitaktische Waferherstellung .....	57
Neubestimmung der Auger-Rekombination in Silicium mithilfe TOPCon-passivierter Lebensdauerproben .....	58
Prozesstechnologie für die kostengünstige Massenfertigung von TOPCon-Solarzellen .....	59
Hochdurchsatz-Dispensstechnologie zur Einsparung von Silber für die Solarzellenmetallisierung .....	60
Auf dem Weg in den Massenmarkt: Galvanische Kupfermetallisierung für Siliciumsolarzellen .....	61
30 % Silbereinsparung durch Schindelzellverschaltung mit lasergeschweißter Aluminiumfolie .....	62
»Green Manufacturing« – Ökobilanzierung für eine ressourceneffiziente PV-Wertschöpfungskette .....	63
Simulationsgestützte Analyse und Optimierung von Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen .....	64
Organische Photovoltaik: Neue Rekordwirkungsgrade für Zellen und Minimodule .....	65
Bessere Vergleichbarkeit von Modulen mit Virtual Energy Rating .....	66
Effiziente PV-Leichtbaumodule für Nutzfahrzeuge .....	67
Flächenpotenzial für schwimmende Solarkraftwerke in Baden-Württemberg .....	68
Zerstörungsfreie Untersuchung von PV-Modulen .....	69
Integration von Solarzellen mit fünf pn-Übergängen in Konzentratormodule .....	70

Rekord für photovoltaische Wandlung von Licht in Elektrizität: Laserleistungszelle mit 68,9 % Wirkungsgrad .....	71
Interaktive Gebäudemonitoring-Tools für die Energiewende .....	72
Wärmepumpensysteme in bestehenden Mehrfamiliengebäuden .....	73
Luft-Wasser-Wärmepumpen leiser gestalten .....	74
»SpeedColl 2«: Gebrauchsdauerabschätzung für solarthermische Kollektoren und deren Komponenten .....	75
Gewinnung von Rohstoffen aus Geothermalwässern .....	76
»SinoTrough« – ein optimierter Parabolrinnenkollektor für den chinesischen Energiemarkt .....	77
Ökonomische und ökologische Bewertung großskaliger Wasserstoff- und Power-to-Liquid-Szenarien .....	78
Wasserstoff-Qualitätsmessung unter Realbedingungen an PKW-Tankstellen .....	79
Einfluss der Platinbeladung auf die Langzeitstabilität von Brennstoffzellen .....	80
C <sup>3</sup> -MOBILITY – klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft .....	81
Batterieforschung entlang der gesamten Wertschöpfungskette .....	82
Qualitätssicherung entlang der Wertschöpfung – von der Zellproduktion bis in die Anwendung .....	83
Reallabor EnStadt:Pfaff – ein klimaneutrales Quartier für die Zukunft .....	84
Künstliche Intelligenz für Netzbetrieb und Netzplanung .....	85
Hochkompakter Wechselrichter zur Direktanbindung an das Mittelspannungsnetz .....	86
Netzdienlicher Gleichrichter für Ladeinfrastruktur und Elektrolyse .....	87

## Wiederverwendbare Wachstumsvorlagen durch elektrochemisches Ätzen von porösen Schichtstapeln



*Querschliff eines porösen Si-Schichtstapels: unpräpariert (links), infiltriert und geschliffen (mittig) und mit automatisch erkannten porösen Bereichen (rechts).*

Das Wachsen von einkristallinen Wafern aus der Gasphase gewinnt in der Photovoltaik immer mehr an Bedeutung. Hierfür wird der sogenannte epitaktische Wafer (EpiWafer) auf eine ablösbare Wachstumsvorlage abgeschieden, die sich auf einem wiederverwendbaren Substrat befindet. Die kristallographische und elektronische Qualität des EpiWafers wird insbesondere von der Qualität dieser Wachstumsvorlage bestimmt. Um die Kosten und den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck so niedrig wie möglich zu halten, ist eine vielfache Wiederverwendung des Substrats notwendig.

Am Fraunhofer ISE arbeiten wir seit vielen Jahren an wiederverwendbaren Substraten aus Silicium und Germanium. Mittels elektrochemischer Prozesse werden in diese Substrate poröse Schichten mit unterschiedlichen Dicken und Porositäten geätzt. Werden diese Substrate nachfolgend in den Epitaxiereaktoren unter Wasserstoff erhitzt, schließt sich die Oberfläche vollständig zu einer Wachstumsvorlage und in der Tiefe entsteht

eine mechanische Sollbruchstelle, die eine nachfolgende Ablösung der gewachsenen Schicht und Wiederverwendung des Substrats ermöglicht. Wächst man auf einer porösen Wachstumsvorlage nun wiederum Silicium und löst diese Schicht anschließend ab, entsteht ein Si-EpiWafer. Unsere Ausgründung NexWafe GmbH nutzt diesen Ansatz und bringt ihn zur Marktreife. Wir unterstützen dies mit weitergehenden Entwicklungen im Labor.

Im letzten Jahr konnten wir die Qualität und Zuverlässigkeit solcher Wachstumsvorlagen sowohl auf hochdotierten Wafern aus Silicium als auch auf Germanium deutlich verbessern. Grundlage hierfür waren Weiterentwicklungen bei der Charakterisierung der porösen Schichten. Durch Strukturgrößen von wenigen Nanometern und einem sehr spröden Materialverhalten war die Erzeugung von hochaufgelösten Querschnittsbildern im Elektronenmikroskop bislang sehr herausfordernd. Mittels eines Infiltrationsverfahrens und einer angepassten Querschlifftechnik ist es uns nun jedoch gelungen, Querschnittsbilder mit sehr gutem Kontrastverhältnis zu erzeugen. Die Software Dragonfly® erlaubt uns außerdem, diese kontrastreichen Bilder automatisiert auszuwerten. Porositäten und die Größenverteilung der Poren in den verschiedenen Schichttiefen werden dabei, wie hier in der Abb. links gezeigt, mit 19 %, 16 % und 40 % (von oben nach unten) zuverlässig bestimmt. Damit konnte besonders das Verständnis für das Zusammenspiel der elektrochemischen Einzelprozesse wesentlich vertieft werden. Mit der im vergangenen Jahr in Betrieb genommenen Anlagenplattform sind wir in der Lage, auf Waferformaten von bis zu 300 mm runde und 166 x 166 mm<sup>2</sup> quadratische poröse Schichtstrukturen ohne Randaussparung zu ätzen. Das erarbeitete Know-how und die exzellente Anlagenausstattung bilden eine ideale Basis für weitere Qualitätssteigerungen.

### Kontakt

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

*Elektrochemische Ätzbank mit Beleuchtungs- und Kühleinheit für Wafergrößen bis zu einem Durchmesser von 300 mm.*

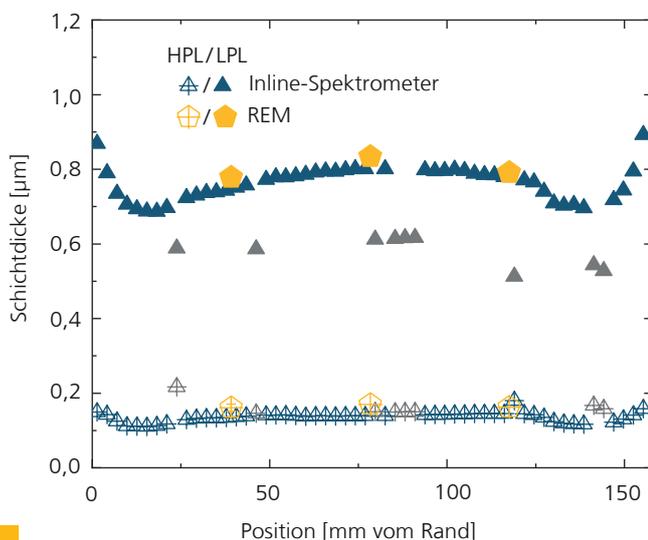


# Inline-Reflexionsspektroskopie zur Inspektion poröser Siliciumschichten für die epitaktische Waferherstellung

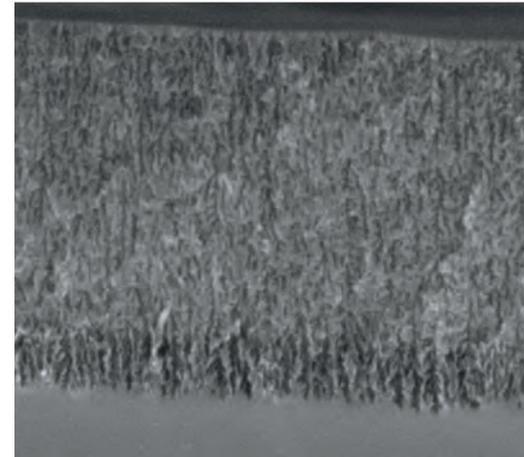
Die epitaktische Herstellung von Siliciumwafern aus der Gasphase ist im Vergleich zum traditionellen Ingot-Wachstum wesentlich kostengünstiger, da kein Sägeverlust auftritt. Bei diesem Verfahren wird die Oberfläche eines Substratwafers porös gemacht und anschließend reorganisiert, um eine Wachstumsgrundlage für den Epitaxiewafer (EpiWafer) zu schaffen und seine spätere Abtrennung zu ermöglichen. Da es sich um eine neue Technologie handelt, müssen spezifische Charakterisierungsanforderungen erfüllt werden. Eine dieser Anforderungen ist eine zuverlässige und zerstörungsfreie Qualitätskontrolle der porösen Schichten.

Um das Wachstum des EpiWafers auf dem Substrat und seine anschließende Abtrennung zu ermöglichen, ist das Ätzen von zwei porösen Siliciumschichten (PorSi) mit unterschiedlichen Eigenschaften nötig. Im Einzelnen besteht die poröse Struktur aus einer Schicht mit geringer Porosität (LPL), die nach einem Hochtemperaturschritt und der damit verbundenen Reorganisation der porösen Struktur die Grundlage für das epitaktische Wachstum bietet. Darüber hinaus bildet sich unter der LPL eine hochporöse Schicht (HPL), die die spätere Trennung des EpiWafers vom Substrat ermöglicht. Die Absolutwerte und die Homogenität der Dicken und Porositäten beider Schichten sind entscheidend, um eine gleichmäßige Wachstumsgrundlage für die Epitaxie zu erhalten und eine gute Ablösbarkeit des EpiWafers zu gewährleisten.

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »Epi-Inspecc« haben wir uns in Zusammenarbeit mit dem Waferhersteller NexWafe mit Fragen der Qualitätskontrolle befasst und eine zerstörungsfreie und schnelle Methode zur Bewertung poröser Siliciumschichten mithilfe der Inline-Spektrophotometrie entwickelt. Sie basiert



*Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines porösen Siliciumschichtstapels, der aus zwei Schichten mit unterschiedlicher Porosität besteht.*



auf einer modellbasierten Anpassung der Reflexionsspektren, mit der sowohl die Dicke als auch die Porosität der Schichten bestimmt werden können. Während der Wafer auf dem Transportband unter dem Spektrometer hindurchläuft, können entlang einer Spur Dutzende von Messpunkten aufgenommen werden. Die Methode ist somit inhärent in der Lage, die Homogenität der Schichten über die gesamte Waferlänge zu bewerten.

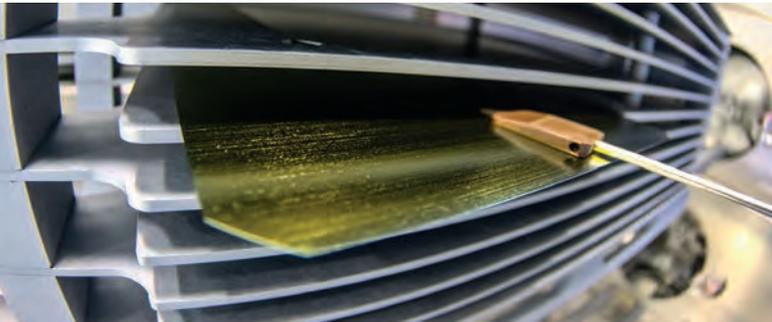
Die Grafik zeigt beispielhaft die Dicke der verschiedenen porösen Siliciumschichten, die aus den Inline-Reflexionsspektren mit unserem modellbasierten Algorithmus gewonnen wurden. Die auf dieser Analyse basierenden Schichtdicken stimmen gut mit Referenzwerten überein, die wir mit einem Rasterelektronenmikroskop (REM) an Querschnitten ermittelt haben. Dies bestätigt, dass die Reflexionsanalyse sowohl für die LPL- als auch die HPL-Schicht realistische Schichtdicken ergibt. Aufgrund der guten Übereinstimmung mit den REM-Bildern wird die Methode nun routinemäßig in der Waferproduktion von NexWafe eingesetzt.

*Schichtdicken mit geringer und hoher Porosität (LPL und HPL) in Abhängigkeit von der Position zum Waferrand. Graue Punkte stellen Ausreißer dar.*

## Kontakt

Henri Vahlman  
Telefon +49 761 4588-5648  
sipv.metrology@ise.fraunhofer.de

# Neubestimmung der Auger-Rekombination in Silicium mithilfe TOPCon-passivierter Lebensdauerproben

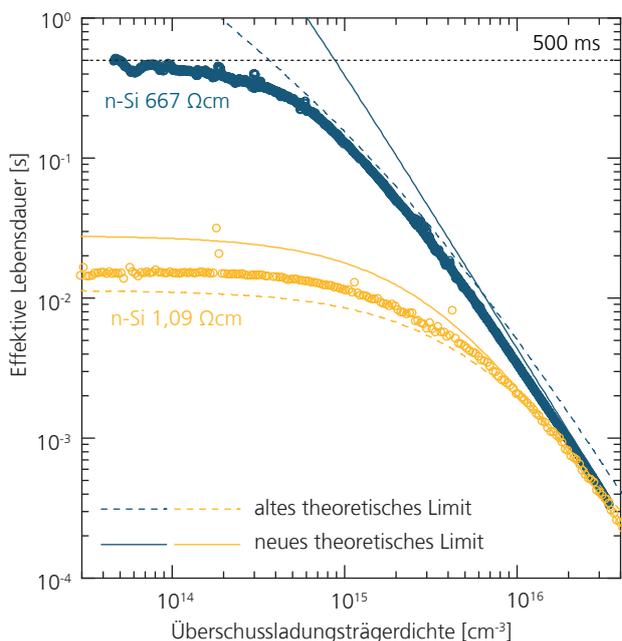


Vorbereitung zur TOPCon-Beschichtung in einer PECVD-Anlage.

Passivierende Kontakte sind eine Schlüsseltechnologie für hocheffiziente Siliciumsolarzellen. Am Fraunhofer ISE forschen wir intensiv in diesem Bereich und konnten auf Basis der von uns entwickelten Technologie TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) [Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von bis zu 26 %](#) herstellen. Dies entspricht einem Rekordwirkungsgrad für beidseitig kontaktierte Solarzellen. Über die letzten Jahre haben wir die TOPCon-Technologie stetig weiterentwickelt und optimiert. Dabei ist es uns gelungen, die Ladungsträgerrekombination an Siliciumproben mit TOPCon-Oberflächenpassivierung nahezu komplett zu unterdrücken und [Ladungsträgerlebensdauern von bis zu 500 ms](#) zu messen. Dieser Rekordwert für Ladungsträgerlebensdauern in Siliciumwafern demonstriert eindrücklich die außerordentliche Oberflächenpassivierungsqualität der TOPCon-Technologie und deren Eignung für zukünftige, hocheffiziente Siliciumsolarzellen.

Neben der Realisierung von hocheffizienten Solarzellen ermöglicht diese äußerst effiziente Oberflächenpassivierung aber auch die höchst genaue Untersuchung von Rekombinationsprozessen im Siliciumwafer. Für die exakte Bestimmung der einzelnen Rekombinationsmechanismen ist die präzise Kenntnis der intrinsischen Auger-Rekombination von fundamentaler

Bedeutung. Die Genauigkeit der Parametrisierung dieses grundlegenden Rekombinationsprozesses ist davon abhängig, wie gut andere Ladungsträgerrekombinationskanäle, wie die Oberflächenrekombination, unterdrückt werden können. Für die Auger-Rekombination ist dies vor allem deshalb von Bedeutung, weil sich über die letzten Jahre gezeigt hat, dass die bisherige Parametrisierung nicht mehr auf dem aktuellen Stand ist. Dabei wird besonders bei Phosphor-dotiertem Silicium mit einem spezifischen Widerstand von ca.  $1 \Omega \text{ cm}$  die Rekombination deutlich überschätzt. Neben unterschiedlichen Charakterisierungsmethoden ist diese Ungenauigkeit für die Simulation und Optimierung von Solarzellen sehr relevant, weil die Auger-Rekombination mit zunehmendem Wirkungsgrad als Leistungsverlustkanal an Bedeutung gewinnt. Vor diesem Hintergrund haben wir in einer internationalen Kooperation mit der Australian National University, der University of Warwick, dem Institut für Solarenergieforschung in Hameln (ISFH) und der Universität Freiburg die Parameter der [Auger-Rekombination in kristallinem Silicium neu bestimmt](#). Im Rahmen dieser fruchtbaren Zusammenarbeit haben wir in den letzten Jahren die Art der Probenherstellung sowie die Charakterisierung untersucht und verglichen, um systematische Fehler möglichst ausschließen zu können. Auf dieser Basis ist für diese fundamentale Materialgröße eine belastbare, allgemein gültige Parametrisierung entstanden, die neben der Silicium-Photovoltaik auch für viele andere siliciumbasierte Halbleiterbauelemente von Bedeutung ist.



## Kontakt

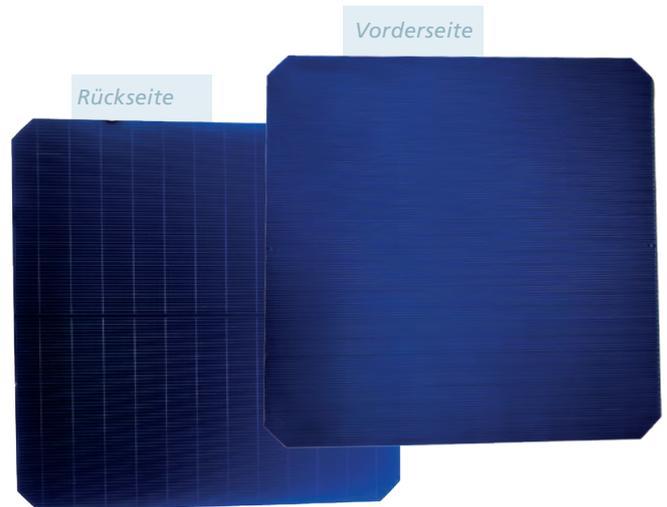
Dr. Armin Richter  
 Telefon +49 761 4588-5395  
 sipv.hieta@ise.fraunhofer.de

*Gemessene Lebensdauerkurven zusammen mit der alten und der neu entstandenen intrinsischen Obergrenze.*

## Prozesstechnologie für die kostengünstige Massenfertigung von TOPCon-Solarzellen

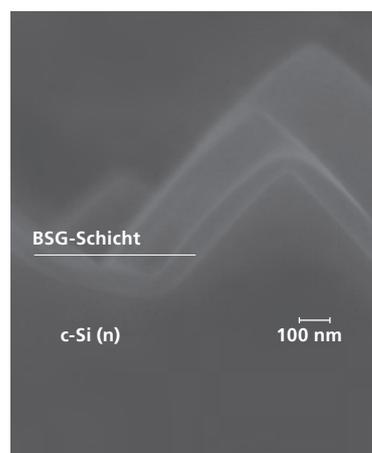
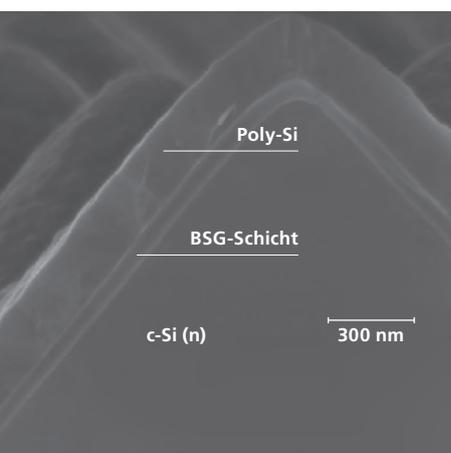
Derzeit finden Siliciumsolarzellen mit passivierenden Kontakten verstärkt Einzug in die industrielle Produktion. Die am Fraunhofer ISE entwickelte Technologie TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) wurde inzwischen in unser Großraumlabor PV-TEC transferiert. Dort haben wir einen Basisprozessfluss zur Herstellung solcher Solarzellen etabliert, bei dem überwiegend industrielle Großanlagen zum Einsatz kommen. Aufgrund des hohen Durchsatzes sind wir in der Lage, Experimente im Umfang von mehreren Hundert Wafern durchzuführen. Diese industriellen Solarzellen aus n-Typ Silicium weisen auf der Rückseite das namensgebende Phosphor-dotierte TOPCon-Schichtsystem auf und auf der Vorderseite einen Bor-dotierten Emitter. Auf vollformatigen TOPCon-Zellen erzielen wir derzeit Wirkungsgrade von bis zu 23,8 % (Zellfläche: 244 cm<sup>2</sup>) mit Leerlaufspannungen über 700 mV. Die Prozesssequenz ist Grundlage für die Kooperation mit verschiedenen Industriepartnern des Fraunhofer ISE und Gegenstand kontinuierlicher Weiterentwicklungen.

Eine große Herausforderung bei der industriellen Herstellung von TOPCon-Solarzellen ist die Entfernung des unerwünschten Umgriffs der Poly-Si-Schicht bei deren rückseitiger Abscheidung auf der Vorderseite der Solarzelle. Hierfür wurde im PV-TEC ein industrietaugliches Verfahren entwickelt, das auf Trockenätzen unter Atmosphärendruck (Atmospheric Pressure Dry Etching, ADE) mittels F<sub>2</sub> basiert. Im Vergleich zu bisher verwendeten nasschemischen Verfahren ermöglicht ADE niedrigere Prozesskosten und höhere Durchsätze aufgrund einer sehr hohen Ätzrate von über 3 µm/min. Der Prozess weist zudem eine starke Einseitigkeit auf, sodass die Poly-Si-Schicht auf der Rückseite der Solarzelle vollständig erhalten bleibt. Die gleichzeitige Entfernung der Poly-Si-Schicht an der Waferkante führt zu einer hohen Stabilität der Solarzellen gegenüber Beaufschlagung mit negativen Spannungen – eine wichtige Voraussetzung für die Integration der Solarzellen in Solarmodule.



Vorder- und Rückseite einer im PV-TEC des Fraunhofer ISE hergestellten bifazialen TOPCon-Solarzelle.

Die aktuell verwendeten Siebdruck-Metallisierungsverfahren erfordern Poly-Si-Schichtdicken von etwa 150 bis 200 nm, um ein Durchfeuern der Metallisierung durch das Schichtsystem zu verhindern. Damit sind hohe Kosten für die Schichtabscheidung verbunden, zudem wirkt sich die dicke Schicht negativ auf die Kurzschlussstromdichte der Solarzelle aus. Durch eine erfolgreiche Zusammenarbeit mit einem Industriepartner steht am Fraunhofer ISE hierfür eine neuartige laserunterstützte Kontaktformierung (Laser Enhanced Contact Optimization, LECO) zur Verfügung. Diese wurde nun auch erstmals erfolgreich auf sehr dünnen Poly-Si-Schichten angewendet. Die damit hergestellten Solarzellen mit konventioneller Siebdruckmetallisierung erreichen bei 80 nm Schichtdicke die gleiche Effizienz von 23,3 % wie der Referenzprozess mit 170 nm Schichtdicke (Zellfläche jeweils: 244 cm<sup>2</sup>).



*Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Querschnitts der Solarzellenvorderseite vor dem Entfernen (links) der Poly-Si-Schicht mittels ADE und danach (rechts).*

### Kontakt

Dr. Sebastian Mack Telefon  
+49 761 4588-5048  
sipv.hieta@ise.fraunhofer.de

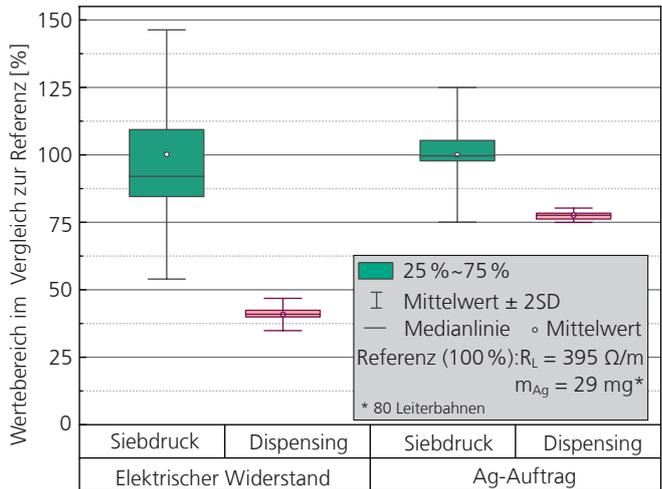
# Hochdurchsatz-Dispensertechnologie zur Einsparung von Silber für die Solarzellenmetallisierung

In der Industrie und der angewandten Forschung wird stetig an einer Verbesserung des Ressourceneinsatzes und einer Erhöhung des Produktionsdurchsatzes für die Metallisierung von Solarzellen gearbeitet. Hierfür haben wir am Fraunhofer ISE das sogenannte parallele Dispensverfahren als alternatives Metallisierungsverfahren entwickelt. Bei diesem Druckprozess wird hochgefüllte Metallpaste durch bis zu 200 parallele Mikrodüsen extrudiert und kontaktlos auf den Siliciumwafer appliziert. Dabei konnten wir bisher Prozessgeschwindigkeiten von bis zu 1000 mm/s für die PERC-Metallisierung und bis zu 600 mm/s für die Heterojunction-Anwendung demonstrieren.

Bei Letzterer werden vor allem sogenannte Niedertemperaturpasten eingesetzt, die sich durch einen vergleichsweise hohen Polymeranteil auszeichnen. Dieser fügt der Metallpaste eine gewisse Dehneigenschaft hinzu, wodurch sich der Pastenstrang zwischen Düsenausgang und Substrat so dehnen lässt, dass sich die Querschnittsfläche verjüngt (Abb. unten).

Ein weiterer Vorteil der Dispensertechnologie ergibt sich beim Blick auf das klassisch eingesetzte Siebdruckverfahren. Dort hinterlässt das Siebgewebe typischerweise einen Abdruck in der Struktur, der zu einer lokalen Reduktion der Leiterbahnhöhe und somit zu einer Erhöhung des elektrischen Widerstands führt. Diese Problematik existiert im Dispensverfahren nicht, sodass dispensierte Leiterbahnen sich durch eine sehr homogene Querschnittsfläche auszeichnen. Die Kombination beider Effekte führt zu einer signifikanten Verbesserung des Verhältnisses von Materialeinsatz (Silber) und Leiterbahnwiderstand (Abb. oben).

Die weitere Entwicklung der Dispensertechnologie treiben wir in mehreren geförderten Verbundprojekten voran. Zum einen werden im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft



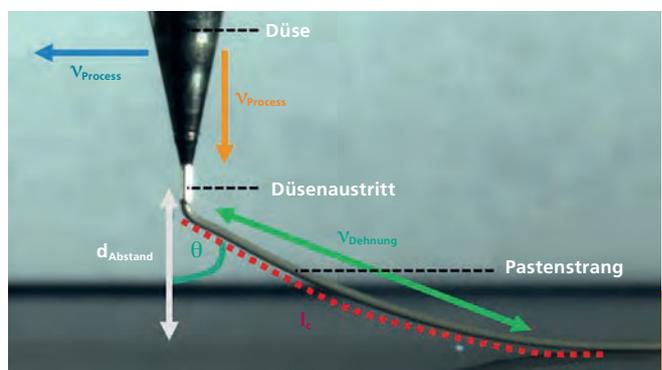
Vorteile der Dispensertechnologie.

und Klimaschutz (BMWK) geförderten Verbundprojekts »altura« Metallgitter auf Dünnschicht-Solarzellenmodule (CIGS) appliziert. Dabei konnten wir bereits Performance-Vorteile bei der Metallisierung auf CIGS-Modulen demonstrieren. Außerdem erlaubt das dispensierte Metallgitter im Vergleich zum klassischen Siebdruckverfahren die Verwendung von breiteren Zellen im CIGS-Modul, sodass die aktive Fläche im Modul maximiert werden kann. In einem nächsten Schritt sollen geeignete Metallpasten für Trocknungstemperaturen unter 200 °C evaluiert werden, um Spannungsverlusten durch die Schädigung der temperaturempfindlichen Schichten von Dünnschicht-Solarzellen vorzubeugen. Weitere Entwicklungsarbeiten finden in den ebenfalls vom BMWK geförderten Verbundprojekten »PreSto« und »BUSSARD« statt, innerhalb derer wir an der Metallisierung von Perowskit-Tandem-Solarzellen bzw. TOPCon-Solarzellen forschen.

## Kontakt

Sebastian Tepner  
 Telefon +49 761 4588-5074  
 sipv.pilot@ise.fraunhofer.de

*Einfluss dehnreologischer Eigenschaften auf das Dispensverfahren.*



## Auf dem Weg in den Massenmarkt: Galvanische Kupfermetallisierung für Siliciumsolarzellen

Am Fraunhofer ISE wird bereits seit mehr als einem Jahrzehnt an Lösungen zur Metallisierung von Siliciumsolarzellen mit Kupferkontakten geforscht. Da Kupfer ca. 100-mal billiger ist als das aktuelle Standardmaterial Silber, galten mögliche Kostensenkungen in der Vergangenheit als Hauptmotivation für die Entwicklung des galvanischen Verfahrens zur Kupferabscheidung auf Solarzellen.

Die derzeitigen Veränderungen auf dem Photovoltaik-Weltmarkt schaffen hier jedoch neue Anreize: Aktuelle Prognosen gehen von einem starken Wachstum bis in den Terawatt-Maßstab aus. Ohne eine deutliche Reduktion des Silberverbrauchs oder sogar den vollständigen Ersatz dieses Materials würden die Wachstumsraten der PV-Produktion bereits im Jahr 2030 dazu führen, dass die gesamte Weltjahresproduktion an Silber für die Herstellung von Siliciumsolarzellen aufgewendet werden müsste.

Kupfer bietet bei nahezu gleicher Leitfähigkeit und geringeren Materialkosten weitere Vorteile gegenüber Silber: Sein CO<sub>2</sub>-Fußabdruck ist um ca. das 50-fache geringer und seine jährliche Förderung ist etwa 650-mal höher.

Das Fraunhofer ISE entwickelt mit seinen Industriepartnern in mehreren Projekten die galvanische Kupfermetallisierung für Solarzellen der nächsten Generation mit passivierenden Kontakten und Metallfingern auf der Vorder- und Rückseite.

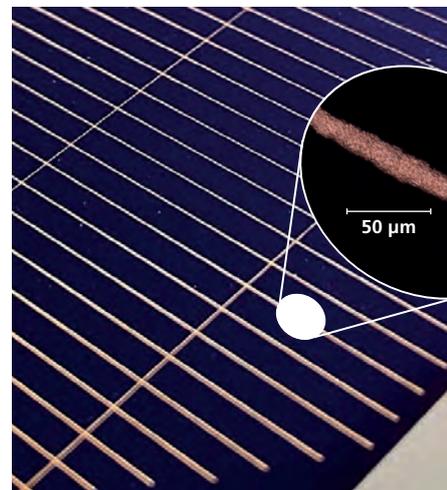
Im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekte »[TALER](#)« und »[TOPCon Cluster](#)« haben wir auf Solarzellen mit passivierenden TOPCon-Kontakten Wirkungsgrade von bis zu 23,8 % auf industriellen Formaten erreicht. Neben mehr als 90 % Einsparung von Silber ist es uns gelungen, den Wirkungsgrad gegenüber herkömmlich metallisierten Referenzen sogar um 0,4 % zu steigern. Der Vorteil ergibt sich aus dem höheren Kurzschlussstrom durch reduzierte Abschattung, aufgrund der äußerst schmalen Kontakte (Abb. unten). Außerdem ist der Füllfaktor der Solarzellen höher als bei der Referenz, was die elektrische Qualität der Metallisierung unterstreicht.

Für die galvanische TOPCon-Metallisierung sind weitere Arbeiten in Vorbereitung, um die entwickelten Verfahren vom Labor auf großtechnische Anlagen zu übertragen.

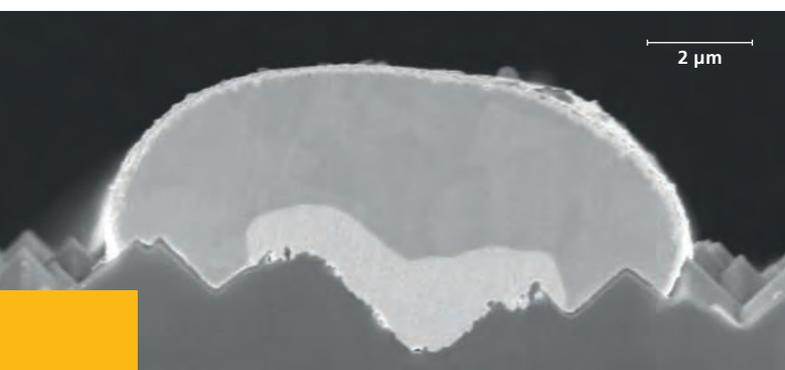
Darüber hinaus haben wir am Fraunhofer ISE ein Galvanik-Verfahren für Heterojunction-Solarzellen (HJT) entwickelt und patentiert, das anstelle aufwendiger Maskierungstechnik auf multifunktionale PVD-Schichten setzt. Solche Schichten werden im Herstellungsprozess der HJT-Solarzelle ohnehin benötigt, sodass sich das Verfahren nahtlos in die Prozessfolge einfügt. Mit diesem sogenannten »NOBLE«-Verfahren (Native Oxide Barrier Layer for selective Electroplating) werden bei einer Silbereinsparung von über 95 % aktuell Wirkungsgrade erzielt, die nahezu das Niveau der Referenz erreichen.

Den Weg in den Massenmarkt für dieses Verfahren ebnet das Fraunhofer-ISE Spin-Off »PV2Plus«. Es wird die Technologie an interessierte Hersteller von Silicium-Heterojunction-Solarzellen liefern und gemeinsam mit Anlagenherstellern für die industrielle Anwendung optimieren.

*Foto- und Mikroskopaufnahme von Kupferkontakten auf einer Heterojunction-Solarzelle, die mit dem »NOBLE«-Verfahren hergestellt wurde.*



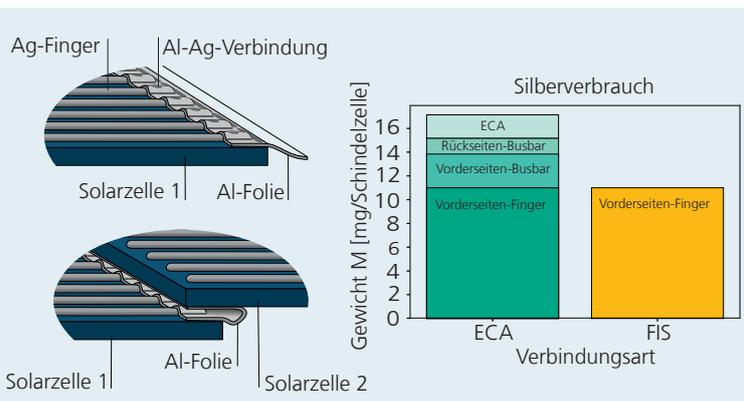
*Elektronenmikroskop-Aufnahme eines galvanischen Kupferkontakts auf einer TOPCon-Solarzelle im Querschnitt.*



### Kontakt

Dr. Sven Kluska  
Telefon +49 761 4588-5382  
sipv.contact@ise.fraunhofer.de

# 30 % Silbereinsparung durch Schindelzellverschaltung mit lasergeschweißter Aluminiumfolie



*Darstellung der FoilMet®-Interconnect Shingling-Zellverbindung (FIS, links); Silberverbrauch einer Schindelsolarzelle in Abhängigkeit der unterschiedlichen Verbindungstechnologien ECA (leitfähiger Klebstoff) und FIS (rechts).*

Bei der Herstellung von Siliciumwafern und -zellen geht der Trend zu größeren Formaten, die bis zu einer Kantenlänge von etwa 210 mm reichen. Große Zellen führen jedoch zu höheren Strömen, wodurch der Serienwiderstandsbeitrag der Module zunimmt. Eine Möglichkeit, die Modulverluste zu reduzieren, ist die Verringerung des Stroms durch Verschaltung von geteilten Solarzellen wie Halbzellen und Schindelzellen. Module mit geschindelten Solarzellen zeichnen sich dadurch aus, dass sich benachbarte Solarzellen in ihrem Randbereich überlappen. So kann ein großer Teil der Metallisierung im Zellzwischenraum, also außerhalb des aktiven Zellbereichs, erfolgen. Der typische Ansatz zur Verschaltung von Schindelzellen basiert auf der Verwendung von elektrisch leitfähigem Klebstoff (ECA), der den Rückseiten-Busbar einer Zelle mit dem Vorderseiten-Busbar einer benachbarten Zelle verbindet. ECAs sind Klebstoffe auf Polymerbasis, die mit elektrisch leitenden Partikeln, meist

Silber, gefüllt sind. Aufgrund des niedrigen Preises von Aluminium im Vergleich zu Silber ist die Verwendung von Aluminiumfolien in der Solarindustrie von großem Interesse.

Mit unserer innovativen Technologie FoilMet®-Interconnect Shingling (FIS) überspringen wir die silberlastigen Siebdruckschritte für die Busbars der Schindelsolarzelle und den Einsatz von ECA und verwenden stattdessen eine 8 µm dicke Aluminiumfolie (Abb. unten). Die Aluminiumfolie wird direkt mit den Silber- und Aluminiumfingern verschweißt, sodass keine busbarähnlichen Strukturen oder ECA erforderlich sind. Auf diese Art und Weise spart die innovative FIS-Technologie etwa 30 % Silber im Modul ein (Abb. links).

Da die FIS-Technologie die Verwendung busbarloser Zellen erlaubt, vereinfacht sie außerdem das Metallisierungslayout bei Zellen und eröffnet damit den Modulherstellern mehr Freiheiten bei der Wahl ihrer Zellen. FIS führt weiterhin zu sehr niedrigen elektrischen Serienwiderständen. In zwei Experimenten mit Strings, bestehend aus drei und sechs Zellen, wurde ein Füllfaktor über 80 % erreicht und bei nachfolgenden Alterungstests keine Degradation der Zellverbindung festgestellt. In beiden Experimenten hat sich gezeigt, dass FIS ein Weg zu einer widerstandssarmen und hocheffizienten Verschaltung sein kann. Da die Aluminiumfolie direkt mit den Elektroden benachbarter Zellen verschweißt wird, ist FIS potenziell für nahezu alle Metallisierungs- und Zellkonzepte einsetzbar.

Die zum Patent angemeldete Technologie nutzt das Potenzial von lasergeschweißter Aluminiumfolie. Sie stellt zum einen eine kostengünstige und flexible Lösung für die Verbindung von Schindelsolarzellen dar. Zum anderen birgt sie ein hohes Potenzial zur Ressourcenschonung und führt außerdem zu einer potenziell höheren Moduleffizienz aufgrund des geringen Serienwiderstandsbeitrags von Aluminiumfolie.

## Kontakt

Jan Paschen  
 Telefon +49 761 4588-5055  
 sipv.contact@ise.fraunhofer.de

*Sechs Schindelzellen verbunden mit FIS. Die angewinkelte Anordnung demonstriert die Flexibilität der Zellverbindung.*



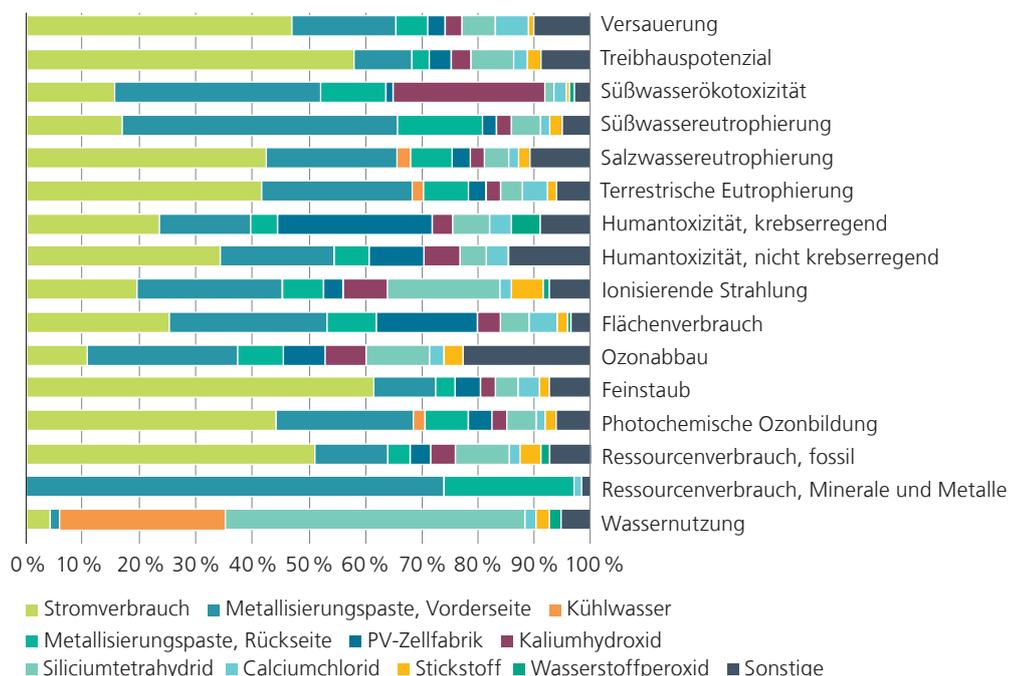
## »Green Manufacturing« – Ökobilanzierung für eine ressourceneffiziente PV-Wertschöpfungskette

Prognosen zufolge ist auf dem PV-Markt bis zum Jahr 2030 mit einem Zuwachs von aktuell etwa 740 GW weltweit installierter Gesamtkapazität auf ca. 2 840 GW zu rechnen. Es ist daher dringend erforderlich, die heutigen Produktionssysteme ressourceneffizienter zu gestalten. Abfall- und Abwasserströme müssen minimiert und in Wertstoffströme umgewandelt werden. Darüber hinaus bietet eine Steigerung der Ressourceneffizienz in der PV-Herstellungskette auch die Möglichkeit, Herstellungskosten zu senken und so die Vermarktung des Endprodukts voranzutreiben. Zwingende Voraussetzung hierfür sind entsprechende Reinigungs- und Recyclingverfahren, die bei der Errichtung und Inbetriebnahme von PV-Produktionslinien implementiert werden müssen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts »Green Manufacturing« forschen wir am Fraunhofer ISE an der Verbesserung der Kreislaufwirtschaft auf Fabrikebene. Dazu wenden wir Konzepte der Lebenszyklusanalyse (LCA) und Kostenbewertung sowie der Ökoeffizienzanalyse und Gefahrstoffanalyse an. Wir arbeiten sowohl am Beispiel einer integrierten c-Si-Ingot/Wafer-, Solarzellen- und PV-Modulproduktion als auch an einer Dünnschicht-PV-Modulproduktion. Dabei analysieren wir die gesamte Wertschöpfungskette von der Rohstoffgewinnung bis zur endgültigen Modulproduktion und betrachten neben industriell etablierten Verfahren und Produkten auch PV-Technologien, die sich noch in der Entwicklung befinden – beispielsweise Perowskitsolarzellen.

Die Grafik zeigt beispielhaft die Ergebnisse einer Hotspot-Analyse für einen typischen PERC-Zell-Produktionsprozess am Standort China. In acht von 16 Wirkungskategorien erweist sich der Stromverbrauch als entscheidender Parameter für negative Umweltwirkungen. Seine relative Auswirkung ist in den Kategorien Feinstaub, Treibhauspotenzial und Ressourcenverbrauch besonders hoch, was sich durch den hohen Anteil von Kohlestrom am chinesischen Energiemix erklären lässt. Der fossil erzeugte Stromanteil beträgt dort in Summe derzeit mehr als 50 %. In sechs von 16 Kategorien ist zudem die Metallisierungspaste als Ursache für die höchsten Umweltwirkungen zu nennen. Über 70 % der Auswirkungen in der Kategorie Ressourcenverbrauch, Mineralien und Metalle und etwa 50 % der negativen Folgen in der Kategorie Süßwassereutrophierung sind auf die Metallisierungspaste zurückzuführen. Auch in den Wirkungskategorien Süßwasserökotoxizität und Flächenverbrauch spielt die Metallisierungspaste die größte Rolle, was am hohen Silbergehalt in der Paste und den damit verbundenen Abbau- und Verarbeitungsschritten der Metallextraktion liegt.

Anhand der Projektergebnisse konnten wir bereits detaillierte Informationen über potenzielle Vorteile vertikal integrierter Produktionsstandorte sowie über geeignete Optimierungsmaßnahmen zur Reduzierung, Aufbereitung und dem Recycling von Abfallströmen gewinnen und Ansätze zur gezielten Substitution einzelner Stoffe in der Produktion entwickeln.



Hotspot-Analyse nach Wirkungskategorien bezogen auf Solarzellen mit einer Größe von 1 m<sup>2</sup>, produziert in China. Normalisierungsmethodik gemäß »Environmental Footprint 3.0«-Methodik.

### Kontakt

Dr. Sebastian Nold  
 Telefon +49 761 4588-5499  
 sipv.assessment@ise.fraunhofer.de

# Simulationsgestützte Analyse und Optimierung von Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen

Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen erreichen höhere Wirkungsgrade als reine Siliciumsolarzellen. Um diesen Vorteil voll auszuschöpfen und damit die Stromgestehungskosten zu senken, müssen sowohl die obere Perowskitsolarzelle (Topzelle) als auch die untere Siliciumsolarzelle (Bottomzelle) kostengünstig herstellbar sein.



Einblick ins Prozessierlabor für die nasschemische Perowskitabscheidung am Fraunhofer ISE.

Silicium-Bottomzellen werden in der Forschung häufig auf Basis der Silicium-Heterojunction-Technologie (SHJ) realisiert. In der Siliciumsolarzellenproduktion kommen dagegen überwiegend Passivated Emitter and Rear Contact (PERC) oder zukünftig auch passivierende poly-Si/SiO<sub>2</sub>-Kontakte (TOPCon) zum Einsatz. Am Fraunhofer ISE haben wir deshalb in einer simulationsgestützten [Analyse](#) die Wirkungsgrade und Produktionskosten von Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen mit unterschiedlichen Bottomzellen untersucht und darauf aufbauend die Stromgestehungskosten berechnet. Ein Ergebnis der Analyse ist, dass für alle Bottomzellkonzepte deutlich niedrigere Stromgestehungskosten für Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen zu erwarten sind als für reine Siliciumsolarzellen. Der höchste Wirkungsgrad wurde für Tandemsolarzellen mit SHJ-Bottomsolarzellen bestimmt. Allerdings fallen hier auch die höchsten Produktionskosten an. Deshalb liegen für alle Arten von Bottomsolarzellen die Stromgestehungskosten ungefähr auf dem gleichen Niveau. Solarzellenproduzenten

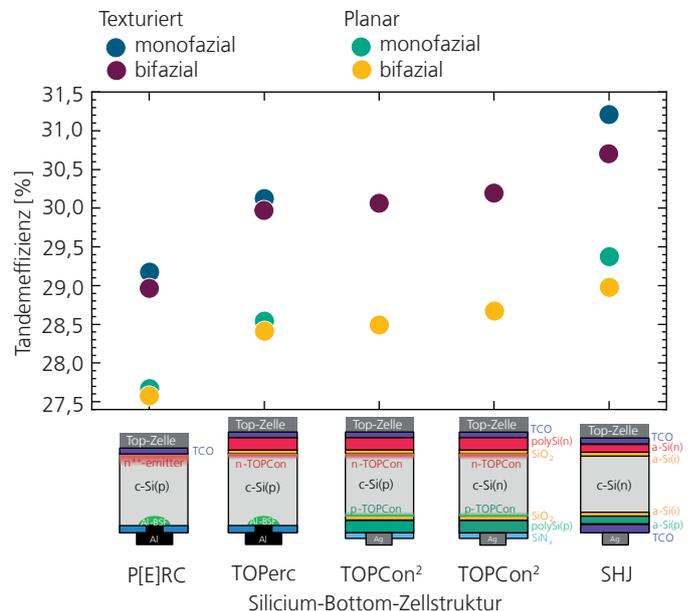
können daher – auf ihren Erfahrungen und Präferenzen aufbauend – den Übergang zur Tandemsolarzelle mit unterschiedlichen Bottomzelltechnologien erreichen. Am Fraunhofer ISE haben wir entsprechend Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen sowohl auf Basis von SHJ als auch auf Strukturen von TOPCon und Tunnel Oxide Passivated Emitter and Rear Contact (TOPerc) realisiert.

Ein weiteres Arbeitsfeld ist die Optimierung der Vorderseiten-elektrode von Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen. Dabei gilt es zwei Hauptanforderungen zu erfüllen: die möglichst kostengünstige und schonende Abscheidung eines hochtransparenten leitfähigen Oxids einerseits, und die Metallisierung mit geringen Kontakt- und Leitungswiderständen bei niedrigen Temperaturen sowie die Kompatibilität mit dem Modulbau andererseits. In einer aufwändigen Simulationsstudie konnten wir die optimalen Parameter für die unterschiedlichen Technologien bestimmen. Zusammen mit Projektpartnern arbeiten wir nun an deren Realisierung. Die Dispenstechnologie verspricht hier besonders [feine Kontaktlinien und geringen Silberverbrauch](#). Ebenfalls konnten wir weltweit erstmals die [Abscheidung von silberfreien Kupferkontakten durch galvanische Prozesse auf einer Perowskitsolarzelle](#) demonstrieren. Diese Arbeiten eröffnen neue Perspektiven für ressourcenschonende, silberarme bzw. silberfreie Metallisierungskonzepte auch für Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen. In laufenden Arbeiten innerhalb des Fraunhofer-Leitprojekts »MaNiTU« beschäftigen wir uns nun damit, die vielversprechende Tandemtechnologie auf großen Flächen mit industrietauglichen Prozessen umzusetzen.

## Kontakt

Dr. Martin Hermle  
Telefon +761 4588-5265  
emergingpv.silicon@ise.fraunhofer.de

Wirkungsgradpotenziale von Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen für verschiedene Bottom-Zellstrukturen.

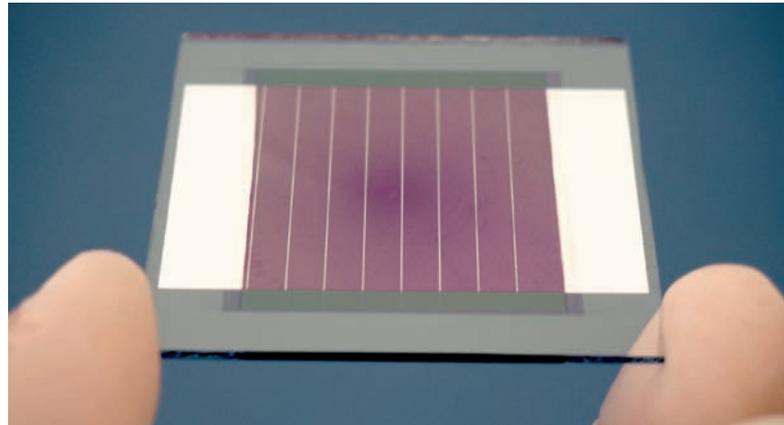


## Organische Photovoltaik: Neue Rekordwirkungsgrade für Zellen und Minimodule

Für die Herstellung von organischen Photovoltaikmodulen werden nur kleinste Energiemengen benötigt. Weiterhin zeichnet sich die organische Photovoltaik (OVP) durch ein hohes Maß an Gestaltbarkeit und Integrierbarkeit, geringes Gewicht, attraktive Farbgebung und mechanische Flexibilität aus. Diese spezifischen, vorteilhaften Eigenschaften erleichtern die Erschließung von völlig neuen Flächenpotenzialen, die sich mit Solarzellen aus kristallinem Silicium nicht oder nur sehr bedingt adressieren lassen.

Mit Werten von ca. 10 % bis 12 % für kleinflächige Laborzellen war der Wirkungsgrad von organischen Solarzellen allerdings bis vor wenigen Jahren noch zu gering, um in neue Anwendungsfelder vorzudringen, da bei ihrer Aufskalierung zu großflächigen Modulen Verluste auftreten. In den letzten Jahren ist jedoch eine sehr dynamische Entwicklung in Hinblick auf die Materialsynthese zu verzeichnen: Speziell die organischen Halbleiter, die in der Absorberschicht zum Einsatz kommen, konnten in ihren Eigenschaften deutlich verbessert werden, und da die organische synthetische Chemie hier mannigfaltige Möglichkeiten bietet, sind weitere Verbesserungen in naher Zukunft zu erwarten. Aufgrund der optimierten Materialien konnte der Wirkungsgrad für organische Solarzellen in den vergangenen Jahren deutlich gesteigert werden. Allerdings geschieht dies zumeist durch Solarzellen mit sehr kleinen Flächen von deutlich unter 0,1 cm<sup>2</sup>.

Am Fraunhofer ISE haben wir im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts »H2OPV« auf einer Zellfläche von > 1 cm<sup>2</sup> einen zertifizierten Rekordwirkungsgrad von 15,24 % erzielt – ein wichtiger Zwischenschritt hin zu großflächigen Modulen. Eine detaillierte [Analyse](#) ergab zudem, dass dieser Wert auf Basis des verwendeten organischen Absorbermaterials noch erheblich gesteigert werden kann. Aufbauend auf diesen vielversprechenden Ergebnissen, haben wir das Design für ein sogenanntes Minimodul erstellt, wobei die Strukturierung sämtlicher Schichten mithilfe eines Lasers vorgenommen wurde. Es ist uns gelungen, auf einer Fläche von 9 cm<sup>2</sup> einen zertifizierten Rekordwirkungsgrad von 13,94 % zu erreichen. Der hohe Wert zeigt, dass die sehr gute Beschichtungsqualität nun auch auf der größeren Fläche realisierbar ist. Aktuell arbeiten wir daran, die Ergebnisse mittels Schlitzgießdüsenbeschichtung auf deutlich größere Flächen zu übertragen. Dabei setzen wir den von uns entwickelten sogenannten invertierten Zellstapel ein, der ohne eine Indiumzinnoxid-Elektrodenschicht auskommt. Der



*Minimodul mit einer Größe von 9 cm<sup>2</sup> aus organischen Solarzellen, das einen zertifizierten Wirkungsgrad von 13,94 % erreicht.*

Vorteil dabei ist, dass die Prozesse unmittelbar auf die Herstellung von flexiblen organischen Solarmodulen mittels Rolle-zu-Rolle-Verfahren übertragbar sind.

Neben diesen Arbeiten, die die Grundlage für die zukünftige Erschließung neuer Märkte bilden, ist ein weiteres Anwendungsfeld zu nennen, für das die organische Photovoltaik die Marktreife gerade erreicht hat: die energetische Versorgung von elektronischen Bauelementen im Bereich des »Internet of Things« (IoT) in Innenräumen. Dort sind organische Solarzellen schon jetzt effizienter als Solarzellen aus kristallinem oder amorphem Silicium, und die Haltbarkeit unter diesen »milden« Bedingungen ist ausreichend hoch. Das Fraunhofer ISE entwickelt hierfür flexible Module, die frei von Indiumzinnoxid sind, und konnte dabei bereits Wirkungsgrade von über 15 % erreichen.

### Kontakt

Dr. Uli Würfel  
Telefon +49 761 203-4796  
emergingpv@ise.fraunhofer.de

# Bessere Vergleichbarkeit von Modulen mit Virtual Energy Rating

Der eigentliche Wert eines Solarmoduls zeigt sich im elektrischen Ertrag über die Lebenszeit. Vor der Inbetriebnahme fällt der Vergleich von Modulen allerdings schwer, da dieser Ertrag von vielen Faktoren abhängt, nicht nur von den Moduleigenschaften. Laborkennwerte wie beispielsweise die Nennleistung bei Standardtestbedingungen (STC) sind zwar leicht vergleichbar, zeigen aber nur einen Teil des Gesamtbilds. Ein Vergleich der Ertragspotenziale kann daher zu signifikant abweichenden Ergebnissen führen.

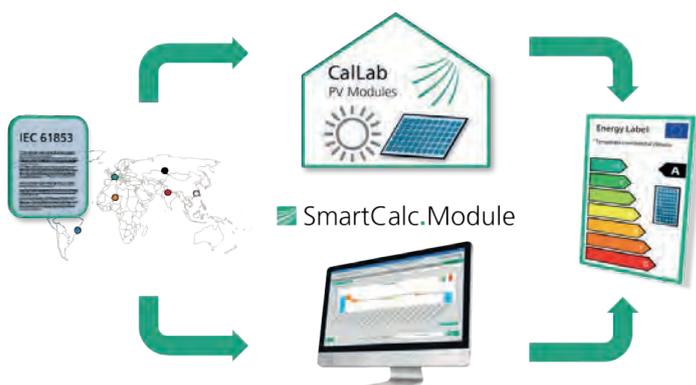
Mit dem »Climate Specific Energy Rating« (IEC 61853) haben wir am Fraunhofer ISE ein Verfahren umgesetzt, das die Vergleichbarkeit von Modulen in Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit während des Betriebs ermöglicht. Basierend auf Messungen unter verschiedenen Bedingungen wird das Modulverhalten für ausgewählte Betriebspunkte (Einstrahlung, Temperatur) charakterisiert. In einem zweiten Schritt haben wir einen

Interpolationsalgorithmus angewendet, der für alle nicht direkt gemessenen Bedingungen eine Modulleistung ermittelt. Anschließend wird für standardisierte Referenzstandorte – die jeweils einer besonderen klimatischen Zone entsprechen – eine Modulertragsberechnung unter Nutzung der interpolierten Messwerte durchgeführt und in einen effektiven Kennwert überführt.

Der Vorteil des Verfahrens liegt in seiner einfachen und schnellen Anwendbarkeit und Aussagekraft in Bezug auf die Vergleichbarkeit von Modulen. Geplant ist daher, das Energy Rating nach IEC 61853 in die Ökodesign-Verordnung und in das europäische Energielabel für Solarmodule, das ab 2023 eingeführt werden soll, zu integrieren. Die für das Energy Rating notwendigen Messungen können im CallLab PV Modules des Fraunhofer ISE mit hoher Präzision durchgeführt werden.

Mit der vom Fraunhofer ISE entwickelten Simulationssoftware »SmartCalc.Module« können wir das Modulverhalten – als Alternative zur Messung – auch simulieren. Mit den Ergebnissen aus der Simulation des digitalen Modulzwilling ist ebenfalls ein Energy Rating in Anlehnung an die IEC 61853 möglich. Dazu wird das Modulverhalten für beliebige Betriebsbedingungen mittels gekoppelter Multiphysiksimulation digital nachgebildet. Für die virtuelle Abbildung des Moduls werden Materialparameter und Kenndaten der eingesetzten Solarzellen benötigt, jedoch keine Messungen am Modul. Die Bestimmung des Ertragspotenzials und eine Optimierung des Moduldesigns sind somit schon in frühen Entwicklungsphasen möglich. Das Vorgehen ist im Vergleich zum Messverfahren besonders flexibel, schnell und kostengünstig. Modulkomponenten und -designs können optimiert, Entwicklungsroadmaps bewertet und Technologien verglichen werden.

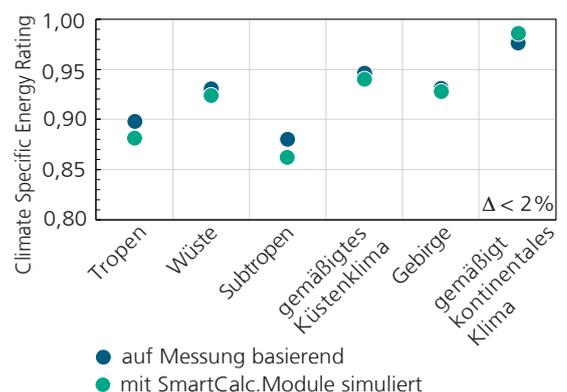
Vergleichbare Modulbewertung über simulations- und messungs-basiertes Energy Rating.



## Kontakt

Max Mittag  
 Telefon +49 761 4588-5927  
 pvmod.tech@ise.fraunhofer.de

Ablauf des Climate Specific Energy Ratings eines Moduls für verschiedene Standorte unter Nutzung eines messungsbasierten und eines simulationsbasierten Ansatzes nach IEC 61853.



## Effiziente PV-Leichtbaumodule für Nutzfahrzeuge

In den vergangenen Jahren sind Photovoltaikmodule durch stark gesunkene Kosten und gestiegene Effizienz immer attraktiver für die Fahrzeugintegration geworden. Besonders die großen Dachflächen von Nutzfahrzeugen eignen sich für anwendungsoptimierte PV-Module in Leichtbauweise.

Immer mehr Hersteller bieten Elektro-LKWs an, deren Antriebsbatterien mit direkt am Fahrzeug erzeugtem Solarstrom geladen werden können. Bei Diesel-LKWs kann integrierte Photovoltaik Kühlaggregate mitversorgen.

Eine neue Studie des Fraunhofer ISE zeigt, dass in Europa 5 % bis 9 % des jährlichen Energiebedarfs einer elektrischen Sattelzugmaschine mit Auflieger durch fahrzeugintegrierte PV (VIPV) gedeckt werden kann. Für andere Fahrzeugkategorien, beispielsweise Transporter, kann sogar rechnerisch mehr als ein Drittel des Energiebedarfs durch VIPV gedeckt werden. Dies bestätigt eine Messkampagne des Fraunhofer ISE aus dem Jahr 2017. Sie hatte ergeben, dass ein typischer LKW-Auflieger mit 40 Tonnen zwischen 5 300 und 7 400 kWh jährlich durch integrierte PV-Module erzeugen kann. Das entspricht einer Einsparung von ca. 5 % bis 7 % des jährlichen Energiebedarfs.

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »Lade-PV« entwickelt das Fraunhofer ISE gemeinsam mit den Projektpartnern TBV Kühlfahrzeuge GmbH, SUNSET Energietechnik GmbH, Alexander Bürkle GmbH & Co. KG sowie der M&P Motion Control and Power Electronics GmbH Lösungen zur Integration von Photovoltaikmodulen in Nutzfahrzeugen. Im Rahmen des Projekts konnte nun ein 18-Tonner-Elektro-LKW als Demonstrationsfahrzeug in Betrieb genommen werden. Die PV-Module wurden so angekoppelt, dass unter Berücksichtigung aller sicherheitsrelevanter Belange direkt in die Hochvoltbatterie eingespeist werden konnte.



*Elektro-LKWs und andere, auch nicht elektrisch betriebene, Nutzfahrzeuge können mit Solarstrom Energie sparen.*



Die leistungselektronische Integration der PV-Module und damit der Anschluss an die Fahrzeugbatterie ist durch die Hochspannung > 300 V auf der PV-Seite besonders kritisch. Durch eine eigene Entwicklung, die als Patent eingereicht wurde, ist es möglich, die Sicherheitsanforderungen für den Straßenverkehr und für PV-Systeme zu erfüllen und die Module direkt an das Hochvoltsystem im Fahrzeug anzuschließen.

Die integrierten PV-Module erhöhen das Gewicht des Fahrzeugs um weniger als 4,5 kg/m<sup>2</sup> gegenüber einem Kühlfahrzeug mit konventionellem Sandwichdach. Beim Demonstrations-LKW entspricht dies einem zusätzlichen Gewicht von nur ca. 80 kg für die PV-Module. Die PV-Module sind vollständig in die Fahrzeugkofferaußenhaut integriert, haben keine herausstehenden Teile und erhöhen den Aufbau nur um maximal 5 mm.

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnte die Robustheit des Modulaufbaus gegenüber extremen thermischen und mechanischen Belastungen bereits in Alterungs- und Belastungstests nachgewiesen werden.

*Der DC/DC-Wandler und die Service Disconnect-Box sitzen platzsparend unter dem LKW-Koffer.*

### Kontakt

Christoph Kutter  
Telefon +49 761 4588-2196  
pvmod.vipv@ise.fraunhofer.de

# Flächenpotenzial für schwimmende Solarkraftwerke in Baden-Württemberg

Schwimmende PV (FPV) eröffnet als Technologie der integrierten Photovoltaik neue Flächenpotenziale und trägt zur Vermeidung von Landnutzungskonflikten bei. Weltweit wurden bereits ca. 3 GW<sub>p</sub> umgesetzt, in Deutschland gibt es bislang nur wenige, kleine Projekte. Das Fraunhofer ISE beziffert das technische FPV-Potenzial allein auf künstlichen Gewässern in Deutschland auf 44 GW<sub>p</sub>.

Vor diesem Hintergrund haben wir in einem vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg geförderten Projekt das theoretische, technische und wirtschaftlich-praktisch erschließbare FPV-Potenzial dieser Technologie für Baden-Württemberg ermittelt. Dieses sollte mithilfe geographischer Informationssysteme (GIS) gewässergenau und unter Einbeziehung lokaler Randbedingungen berechnet werden. Zur Durchführung der Potenzialanalyse haben wir dazu zunächst einen Katalog harter und weicher Restriktionskriterien für FPV-Installationen erarbeitet. Harte Restriktionskriterien stellen hierbei klare Ausschlusskriterien dar, während weiche Restriktionskriterien lediglich eine Abstufung in eine geringere Eignungskategorie bewirken. Die einzelnen Kriterien sollen dazu beitragen, sowohl technische Aspekte zu berücksichtigen als auch einer ökologischen und hydrologischen Destabilisierung des Gewässers vorzubeugen. Die Potenzialanalyse beschränkt sich nach Vorgabe des Auftraggebers auf Baggerseen in aktiver Auskiesung.

Für die Potenzialberechnung wurden drei Szenarien erstellt, denen unterschiedliche Flächenbelegungen und Seeflächennutzungseffizienzen zugrunde liegen. Diese Szenarien tragen in verschiedener Ausprägung dem Umstand Rechnung, dass eine zu große Belegung eines Gewässers dessen ökologisches und hydrologisches Gleichgewicht beeinflussen kann. Das erste Szenario spiegelt eine geringe Seeflächennutzungseffizienz (SFNE) von 0,6 MW<sub>p</sub>/ha und keine Obergrenze bei der

Flächenbelegung wider, wohingegen das zweite und dritte Szenario eine höhere SFNE von 1,18 MW<sub>p</sub>/ha bei maximalen Flächenbelegungen von 10 % bzw. 45 % umfassen.

Anhand der Analyse konnten mehr als 60 geeignete und bedingt geeignete Baggerseen in Auskiesung mit einer Gesamtfläche von ca. 1700 ha ausgemacht werden. Die größten FPV-Potenziale befinden sich in den Regionen des südlichen und mittleren Oberrheins, insbesondere in den Landkreisen Karlsruhe, Rastatt und dem Ortenaukreis.

Abschließend wurden an einem Beispielstandort drei FPV-Anlagen mit gleicher installierter Nennleistung, aber unterschiedlichen Aufständehöhen simuliert. Diese Aufständehöhen berücksichtigen unterschiedliche lokale Randbedingungen, zeigen aber ähnlich hohe spezifische Erträge von etwa 1100 kWh pro kW<sub>p</sub> und Jahr.

Die Studie zeigt, dass eine gewässerspezifische Analyse der FPV-Potenziale großer Regionen mittels GIS-Methoden zügig durchführbar ist. Die dabei auftretenden Unsicherheiten bezüglich ökologischer und administrativer Randbedingungen können durch verschiedene Szenarien erfasst werden. Diese ergeben, selbst bei Fokus auf eine kleine Teilmenge vorhandener künstlicher Gewässer – Kiesseen in Auskiesung – ein FPV-Stromerzeugungspotenzial von bis zu 2,5 % des Jahresbruttostromverbrauchs in Baden-Württemberg.

*FPV-Anlage in Renchen/Baden, an der hydrologische und ökologische Untersuchungen vorgenommen werden.*

## Kontakt

Konstantin Ilgen  
Telefon +49 761 4588-5575  
pvmod.fpv@ise.fraunhofer.de



## Zerstörungsfreie Untersuchung von PV-Modulen

Zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden nehmen in der Bewertung der Zuverlässigkeit von PV-Modulen eine wichtige Rolle ein, da sie die Detektion und Beurteilung von Alterungserscheinungen und -mechanismen erlauben, ohne das Prüfobjekt zu beschädigen. Dies ermöglicht beispielsweise, den Verlauf von Alterungsphänomenen in mehreren Schritten der Nutzungsphase oder zwischen Alterungsprüfungen zu beobachten und flexibel auf erste Testergebnisse zu reagieren.

Zusätzlich zu konventionellen zerstörungsfreien Methoden wie Raman-Spektroskopie oder Dark-Lock-In-Thermografie basiert das Funktionsprinzip der Ultraschallmikroskopie (Scanning Acoustic Microscopy, SAM) auf der Anregung mit Ultraschallwellen, die an Materialgrenzflächen reflektiert werden. Durch die anschließende Verarbeitung des reflektierten Signals kann man Informationen über mechanische Eigenschaften, Materialdicke oder Fehlstellen der verschiedenen Materialschichten im PV-Modulverbund erhalten. Je nach Anregungsfrequenz und Messparametern können so passend zur Fragestellung spezifische Komponenten von PV-Modulen, wie die verschiedenen Schichten der Rückseitenfolie, Einkapselungspolymere, Verschaltung und Solarzelle bis hin zum Glas, untersucht werden.

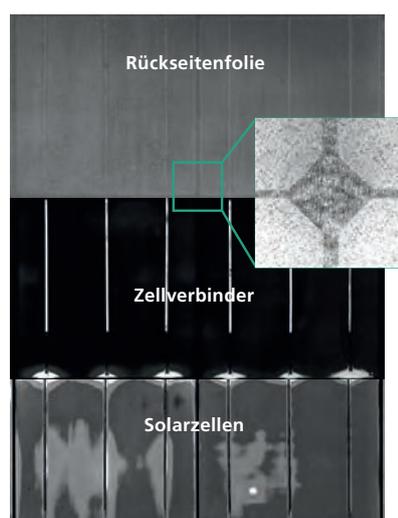
Durch die Aufnahme vieler benachbarter Messpunkte in einem 2D-Punkttraster ist es auch möglich, Abbildungen bestimmter Schichten zu erzeugen. So können je nach Auswahl der Anregungsfrequenz und Signalverarbeitung binnen weniger Minuten z. B. bestimmte Schichten von polymeren Rückseitenfolien oder der Zellverschaltung visualisiert werden (Abb. unten).

*Ultraschallmikroskop während der Aufnahme eines 4-Zell-Moduls.*



Eine besondere Stärke der beschriebenen Methode liegt in der Detektion von Fehlstellen, wie Rissen oder Luftporenschlüssen, da an diesen Stellen der Schall intensiv reflektiert wird, was zu deutlichen Signalen führt. Dieser Ansatz findet bereits in der Analyse von defekten Rückseitenfolien in vielen unserer Projekte mit Industriepartnern Anwendung. So können durch Witterungsbedingungen erzeugte Risse in einzelnen Schichten der Rückseitenfolie ohne Zerstörung der Materialien erkannt werden, selbst wenn diese von außen nicht sichtbar sind (Abb. unten). Außerdem kann die bildgebende Methode anhand der räumlichen Verteilung solcher Risse auch Rückschlüsse auf die konkrete Belastung liefern. Im gezeigten Fall konnten wir einen Zusammenhang der Degradation mit einer erhöhten UV-Belastung zwischen den Zellen nachweisen. In anderen Fällen zeigt sich z. B. eine Korrelation mit Rissen hinter den Busbars, was auf besonderen Einfluss von mechanischem Stress, hervorgerufen durch Tag-Nacht-Zyklen, hinweist.

Weitere Optimierungen der Methode sowie die Erweiterung des Temperaturbereichs untersuchen wir aktuell mit dem Hersteller PVA TePLA im Projekt »ZeitnaH«, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert wird.



*Ultraschallmikroskop-Aufnahmen von verschiedenen Modulschichten. Vergrößerung: interne Risse in der Rückseitenfolie.*

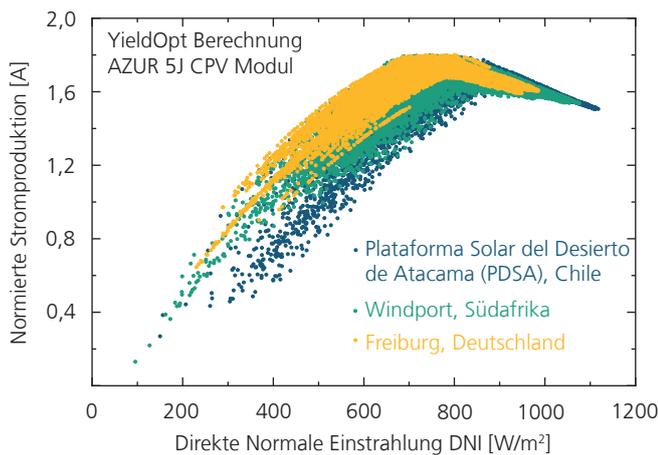
### Kontakt

Dr. Paul Gebhardt  
Telefon +49 761 4588-5042  
tlpv@ise.fraunhofer.de

# Integration von Solarzellen mit fünf pn-Übergängen in Konzentratormodule

In der Konzentrator-Photovoltaik (CPV) wird das Sonnenlicht durch kostengünstige Optiken auf kleine Solarzellen fokussiert. Der Anteil der Solarzellenfläche an der Modulapertur ist somit um den Konzentrationsfaktor ( $> 500$ ) reduziert und es können komplexe Mehrfachsolarellen mit höchsten Effizienzen eingesetzt werden. Bisher war der Standard eine Solarzelle mit drei pn-Übergängen. Unser Projektpartner AZUR SPACE Solar Power GmbH bringt nun eine neue Fünffachsolarelle auf den Markt, die eine noch höhere Modulleistung verspricht.

Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Verbundprojekt »[QuintuMod](#)« wird diese hocheffiziente und massenfertigungstaugliche Solarzellenstruktur in das C3PV-Modul von AZUR SPACE integriert. Am Fraunhofer ISE untersuchen wir das Leistungsverhalten dieser Module durch Messungen auf unserer Nachführeinheit am Außenmesstand in Freiburg. Hier führen wir auch Leistungsbestimmungen nach IEC 62670-3 unter CSTC-Bedingungen ( $1000 \text{ W/m}^2$ , AM 1,5d Spektrum und  $25^\circ\text{C}$  Solarzellentemperatur) durch. Für das neue Modul konnten wir bereits einen sehr guten Wirkungsgrad von 35,3 % bei Konzentrator-Standardtestbedingungen (CSTC) bestimmen.



*Produzierter Strom eines CPV-Moduls, normiert auf eine Einstrahlung DNI von  $1000 \text{ W/m}^2$  für verschiedene Standorte (Chile, Südafrika und Deutschland).*

Allerdings ist für den wirtschaftlichen Erfolg nicht die maximal erreichbare Effizienz unter CSTC-Bedingungen entscheidend, sondern der Energieertrag über die Laufzeit. Im realen Betrieb liegt die Temperatur der Solarzelle meist über  $80^\circ\text{C}$ . Im Rahmen des Projekts wird daher die Solarzellenstruktur von AZUR SPACE so angepasst, dass alle Teilzellen der Mehrfachsolarelle bei Betriebstemperatur den gleichen Strom generieren und damit die höchste Gesamtleistung erzielen. Am Fraunhofer ISE entwickeln wir Messroutinen weiter, sodass wir bei hohen Temperaturen sowohl die externe Quanteneffizienz (EQE) als auch Solarzellen-Linseneinheiten vermessen können.

Auf den Energieertrag haben außerdem die Umgebungsbedingungen am jeweiligen Standort der CPV-Installation einen Einfluss. Die Grafik links zeigt den – mithilfe unseres selbst entwickelten Modells »YieldOpt« – berechneten Strom bei unterschiedlichen Einstrahlungsbedingungen. Die verschiedenen Standorte weisen unterschiedliche Verläufe auf, die durch Änderungen im solaren Spektrum zu erklären sind. Im Rahmen des Projekts am Fraunhofer ISE untersuchen wir, wie groß dieser Einfluss auf den Energieertrag ist und wie er berücksichtigt werden kann.

## Kontakt

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

*Sonnennachführeinheit am Fraunhofer ISE zur Charakterisierung der Konzentratormodule von AZUR SPACE Solar Power GmbH.*

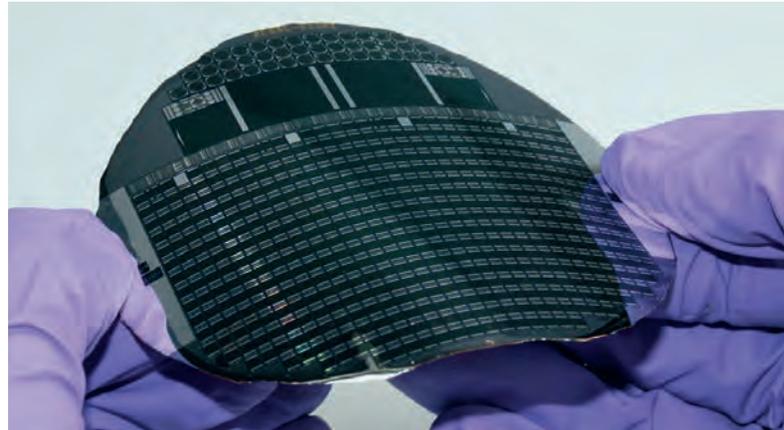


# Rekord für photovoltaische Wandlung von Licht in Elektrizität: Laserleistungszelle mit 68,9 % Wirkungsgrad

Solarzellen können neben ihrer klassischen Anwendung auf Dächern und Freiflächen auch zur optischen Leistungsübertragung genutzt werden. Dazu wird monochromatisches Laserlicht im Freistrahlfeld oder über optische Fasern zum Verbraucher gesendet und dort mithilfe spezieller Photovoltaikzellen, sogenannter Laserleistungszellen, in elektrische Leistung gewandelt. Diese »Power-by-Light«-Technologie kommt mittlerweile in unterschiedlichen Anwendungsbereichen zum Einsatz. Die inhärent elektrisch-isolierte Verbindung bietet beispielsweise Vorteile hinsichtlich elektromagnetischer Verträglichkeit sowie beim Blitz- und Explosionsschutz. Die Energieübertragung kann zusätzlich mit optischer Datenübertragung in einem System kombiniert werden. Anwendungsbeispiele reichen von fasergekoppelten Sensoren zur Zustandsüberwachung von Windenergieanlagen über kabellose Versorgung von Implantaten bis hin zu Anwendungen in der Luft- und Raumfahrt oder in der kabellosen Versorgung des Internet der Dinge.

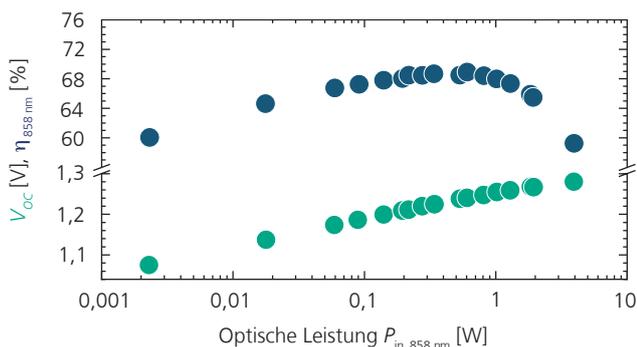
Aufgrund des breitbandigen Sonnenspektrums ist der Wirkungsgrad von Solarzellen durch Thermalisierungs- und Transmissionsverluste begrenzt. Erstere resultieren aus der Überschussenergie von hochenergetischen Photonen im Vergleich zur Bandlückenenergie des Absorbermaterials. Letztere entstehen durch die Transparenz des Halbleitermaterials für langwelliges Licht. Für Laserleistungszellen können diese Verluste durch eine optimale Abstimmung von Bandlückenenergie des Absorbers und Photonenenergie des Lasers nahezu vollständig vermieden werden.

Mit einer GaAs-basierten Laserleistungszelle ist es uns im letzten Jahr gelungen, einen neuen Rekordwert im photovoltaischen Wandlungswirkungsgrad zu erreichen. Neben der oben genannten Anpassung von Laserwellenlänge und



*Flexibler 4-Zoll-Wafer mit GaAs-basierten Laserleistungszellen, prozessiert in Dünnschichttechnologie.*

Absorbermaterial haben wir dabei einen Dünnschichtansatz verfolgt und in dem vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt »Lightbridge« weiterentwickelt. Dabei wurde die Rückseite der nur etwa 2  $\mu\text{m}$  dünnen Zellstruktur mit einer elektrisch leitfähigen Spiegelschicht versehen. Dies ermöglichte zum einen die Ausnutzung von optischen Resonanzeffekten, zum anderen das sogenannte Photonenrecycling. Für den Absorber der 0,054  $\text{cm}^2$  messenden Zelle wurde eine n-GaAs/p-AlGaAs-Heterostruktur mit besonders geringen Rekombinationsverlusten entwickelt. Für die Wandlung von monochromatischem Licht mit einer Wellenlänge von 858 nm in elektrische Leistung konnten wir so bei einer Bestrahlungsstärke von 11,4  $\text{W}/\text{cm}^2$  erstmals einen Wirkungsgrad von 68,9 % demonstrieren.



*Die gemessenen Leistungsparameter monochromatischer Wirkungsgrad  $\eta_{858 \text{ nm}}$  und Leerlaufspannung  $V_{OC}$  der 0,054  $\text{cm}^2$  messenden GaAs-basierten Rekordzelle, aufgetragen als Funktion der eingestrahnten optischen Leistung bei 858 nm.*

## Kontakt

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

## Interaktive Gebäudemonitoring-Tools für die Energiewende

Die Dekarbonisierung des Bausektors erfordert neue Energieversorgungs- und Betreiberkonzepte, die den gestiegenen Anforderungen der letzten Jahre hinsichtlich Anlagentechnik, energetischer Performance und Nutzerkomfort Rechnung tragen. Zur Unterstützung des Qualitätsmanagements von Gebäuden hat das technische Monitoring als neue Dienstleistung für die Baubranche daher deutlich an Bedeutung gewonnen und wird im Rahmen von Neubauprojekten und Sanierungen von Gebäuden zunehmend berücksichtigt.

Das technische Monitoring ermöglicht einen energieeffizienten, funktions- und bedarfsgerechten Gebäudebetrieb. Als zentrales Regelwerk in öffentlichen Gebäuden fungiert hierbei die Richtlinie des Arbeitskreises Maschinen- und Elektrotechnik staatlicher und kommunaler Verwaltungen (AMEV) zum technischen Monitoring (AMEV-TMon). Gleichzeitig ist

*MoTive vereinfacht die Planung und die Umsetzung eines intelligenten technischen Monitorings, beispielsweise von raumlufttechnischen Anlagen wie in der Abbildung dargestellt.*



### Kontakt

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

ein anhaltender Trend zur Planung und Umsetzung von Bauprojekten nach der Methode des Building Information Modeling (BIM) zu verzeichnen. Sie erlaubt die vernetzte und digital gestützte Zusammenarbeit über alle Gewerke und Lebenszyklen eines Gebäudes von der Planung über den Bau bis hin zur Bewirtschaftung. Bisher fehlen jedoch geeignete Werkzeuge, um die vorhandenen BIM-Informationen mit den Anforderungen der AMEV-TMon abzugleichen und die Inbetriebnahme, Einregulierung und energetische Optimierung der Anlagen auf Basis von Messdaten zu unterstützen.

Ein Ziel des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Forschungsvorhabens »[BUiLD.DIGITIZED](#)« ist, Werkzeuge zu entwickeln, die eine Inbetriebnahme gebäudetechnischer Anlagen auf Basis von BIM-Informationen digital unterstützen. Im Rahmen des Forschungsprojekts hat das Fraunhofer ISE das Tool »MoTive« (Monitoring Interactive) entwickelt und anhand mehrerer Demonstratoren getestet.

MoTive extrahiert relevante Informationen zu Sensoren und Aktoren aus einer BIM-Planung und verknüpft diese mit den Prüfgrößen-Datensätzen der AMEV-TMon. Die Informationen aus unterschiedlichen Quellen wie Dateien der Industry Foundation Classes (IFC), Prüfgrößen nach AMEV-TMon oder Datenpunktlisten aus der Gebäudeautomation werden dabei in einer Web-Applikation zusammengeführt. Auf dieser Basis bietet MoTive verschiedene Funktionalitäten, um die Planung und Realisierung eines technischen Monitorings digital zu unterstützen. Die Software erstellt in ihrer aktuellen Version beispielsweise automatisch ein Anlagenverzeichnis sowie ein interaktives Anlagenschema und ermöglicht den Abruf aller relevanten semantischen und topologischen Informationen zu den Anlagen, Sensoren und Aktoren. Auf diese Weise werden Zusammenhänge erschlossen, die Monitoring-Dienstleister andernfalls mühsam manuell erstellen und prüfen müssen, was die Inbetriebnahme gebäudetechnischer Anlagen und die Betriebsführungsprozesse stark vereinfacht. Im weiteren Verlauf des Projekts »BUiLD.DIGITIZED« sollen die Funktionalität und Einsatzbarkeit des Werkzeugs für die Inbetriebnahme mit Praxispartnern im neuen Laborgebäude der Hochschule Offenburg untersucht werden.

## Wärmepumpensysteme in bestehenden Mehrfamiliengebäuden

Zur Erreichung der Klimaschutzziele im Gebäudesektor ist – über die Verbesserung der energetischen Qualität von Gebäudehüllen hinaus – eine möglichst zügige Umstellung der Wärmeversorgung auf CO<sub>2</sub>-arme Technologien notwendig. Dazu eignen sich besonders Wärmepumpen, die der Umwelt Wärme entziehen und mithilfe von elektrischer Energie dem Gebäude auf einem nutzbaren Temperaturniveau zur Verfügung stellen.

Aufgrund des stetig steigenden Anteils erneuerbarer Energie im Strommix tragen Wärmepumpen schon heute erheblich zur Dekarbonisierung bei. Zwar ist ihr Einsatz in Neubauten inzwischen Standard, das Potenzial in Bestandsgebäuden ist jedoch noch nicht ausgeschöpft. Für Ein- und Zweifamilienhäuser konnte das Fraunhofer ISE bereits zeigen, dass Wärmepumpen auch im Bestand effizient eingesetzt werden können. In bestehenden Mehrfamiliengebäuden sind sie allerdings noch eher selten anzutreffen. Daher entwickelt und demonstriert das Fraunhofer ISE im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projektverbund [»LowEx-Bestand«](#) gemeinsam mit Industriepartnern neuartige Lösungen zur nachhaltigen Wärmeversorgung bestehender Mehrfamiliengebäude.

Ein Lösungsansatz befasst sich mit niedrigschweligen Anpassungen im Gebäude zur Absenkung von Heizkreistemperaturen. Technisch sind Wärmepumpensysteme in der Lage, auch Anforderungen an hohe Vorlauftemperaturen im Heizsystem zu erfüllen. Eine Absenkung von Systemtemperaturen führt jedoch zu besseren Effizienzen. Ein Maß für die Effizienz ist die Jahresarbeitszahl (JAZ). Auf Basis von Feldtestergebnissen sowie in Simulationen wurde gezeigt, dass mit jedem Kelvin

Minderung der mittleren Heizkreistemperatur eine Verbesserung der JAZ in der Größenordnung von 0,1 zu erwarten ist.

Eine Temperaturabsenkung ist häufig auch in Bestandsgebäuden mit Heizkörpern möglich, besonders wenn der Wärmebedarf durch eine Hüllsanierung reduziert werden kann. Durch Weiternutzung von bestehenden, häufig überdimensionierten Heizkörpern sowie durch einen gezielten Austausch von wenigen kritischen Heizkörpern kann die Wärmepumpeneffizienz schon mit geringen Eingriffen in das Übergabesystem deutlich erhöht werden. In dem ebenfalls vom BMWK geförderten Projekt [»Smartes Quartier Durlach«](#) haben wir diesen Ansatz in Mehrfamilien-Bestandsgebäuden verfolgt. Darüber hinaus gelang es uns dort, ein Gebäude mit photovoltaisch-thermischen Kollektoren (PVT) auszustatten, deren Niedertemperaturwärme als Quelle für die Wärmepumpe genutzt wird. Ein weiteres Gebäude nutzt eine Wärmepumpe mit einem Mehrquellensystem, das ein klein dimensioniertes Erdsondenfeld mit einer Luftaußeneinheit kombiniert. Systemhydraulik und Regelung wurden im Rahmen des vom BMWK geförderten Projekts [»HEAVEN«](#) am Fraunhofer ISE entwickelt.

In einem noch unsanierten Mehrfamilien-Bestandsgebäude in Adorf haben wir außerdem Erfahrungen mit einem Hybrid-Wärmepumpensystem gesammelt. Dieses kombiniert eine Wärmepumpe mit einem Brennwertkessel unter Nutzung einer optimierten Steuerung. Erste Messdaten zeigen, dass trotz einer recht kleinen Dimensionierung der Wärmepumpe (6 kW bei Normbedingung A2/W35 vs. 28 kW Heizkessel) in den Monaten Januar und Februar Deckungsraten der Wärmepumpe zur Raumheizung zwischen 50 % und 61 % erreicht werden konnten. Nach der geplanten energetischen Sanierung der Gebäudehülle ist mit einem deutlich erhöhten Deckungsbeitrag der Wärmepumpe zu rechnen.

*PVT-Kollektorfeld zur Einkopplung von Umweltwärme in eine Wärmepumpenanlage in einem Mehrfamiliengebäude in Karlsruhe-Durlach.*



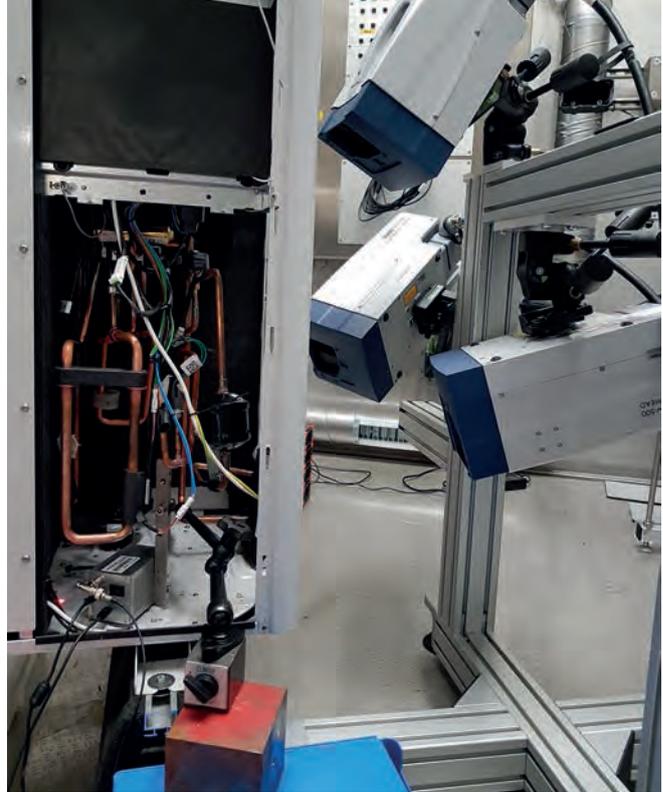
### Kontakt

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

## Luft-Wasser-Wärmepumpen leiser gestalten

Wärmepumpen spielen für eine zukünftige, dekarbonisierte Wärmeerzeugung eine immer größere Rolle. Dies trifft besonders auf Luft-Wasser-Wärmepumpen zu, deren Verkaufszahlen den Markt seit etwa zehn Jahren dominieren. Heutige Heizungsanlagen dieses Typs sind wirtschaftlich günstiger als andere Wärmepumpentypen und verursachen verglichen mit Gasbrennwertkesseln nur noch 50 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen – eine Reduktion, die mit zunehmender Dekarbonisierung des erzeugten elektrischen Stroms sogar noch deutlich steigerbar ist. Durch diesen starken Bedeutungsgewinn sind in Gebieten mit dichter Bebauung zukünftig innovative Lösungen in Bezug auf die Geräuschentwicklung von Wärmepumpen gefragt.

Um neue Ansätze für eine optimierte Wärmepumpenakustik zu untersuchen, hat das Fraunhofer ISE gemeinsam mit dem Fraunhofer IBP das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Projekt »WAMS« initiiert. Im Rahmen des Projekts haben wir Methoden entwickelt, mit deren Hilfe die Ursachen für Geräuschentwicklungen genau identifiziert und vermessen werden können. In enger Zusammenarbeit mit Wärmepumpenherstellern können wir so bereits in einer frühen Entwicklungsphase Vorschläge zur Verbesserung von neuen oder bereits bestehenden Wärmepumpenheizungsanlagen erarbeiten. Der Fokus liegt auf den Verursachern von Luftschall, was vor allem den Ventilator und den Verdichter betrifft. Die Arbeiten des Fraunhofer ISE zielen hierbei besonders auf den Verdichter ab, da in den letzten Jahren bereits erhebliche Verbesserungen bei den Ventilatoren erreicht werden konnten. Somit ist inzwischen der Verdichter häufig die dominierende Quelle bei der Geräuschemission einer modernen Anlage.



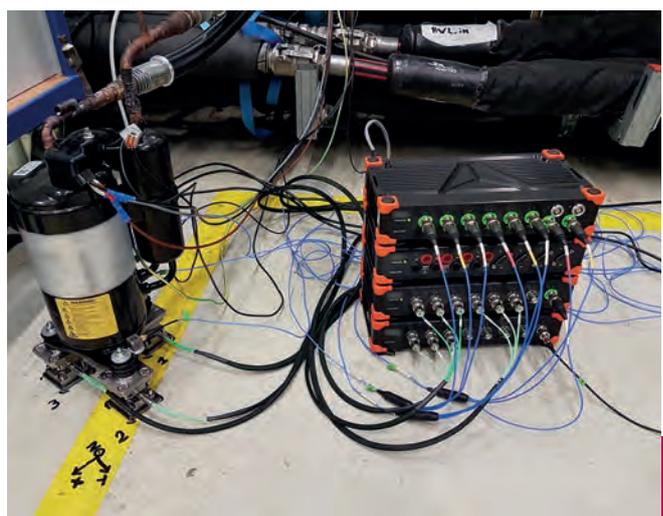
*Strukturdynamische Untersuchung einer Wärmepumpe mit ausgebautem Verdichter.*

Warum ist ein Verdichter aber laut? Um diese Frage zu beantworten, muss das Zusammenspiel zwischen primärem Luftschall sowie Körperschall verstanden werden, der im sogenannten sekundären, auch als indirekt bezeichneten, Luftschall enthalten ist. Zu diesem Zweck haben wir eine experimentelle Methode zur getrennten Erfassung und Untersuchung dieser Größen entwickelt. Sie werden rechnerisch zu einem Gesamtschall zusammengefasst und einer Luftschallmessung am unveränderten Wärmepumpengerät gegenübergestellt. Aus der Differenz lässt sich nach Abzug der Einflüsse durch den Messraum und die Messunsicherheit ermitteln, welche Anteile auf welche Schallarten zurückgehen. Diese Ergebnisse zum Verhalten einzelner Strukturen und Komponenten liefern eine wichtige Grundlage für die Entwicklung leiserer Wärmepumpen.

### Kontakt

Dr. Thore Oltersdorf  
Telefon +49 761 4588-5239  
heatpumps@ise.fraunhofer.de

*Messung der Kurzschlusskraft eines Kältemittelverdichters zur Bewertung der Schallemission von Wärmepumpen.*



## »SpeedColl 2«: Gebrauchsdauerabschätzung für solarthermische Kollektoren und deren Komponenten

Für die Energiewende ist die Bereitstellung von Wärme für Wohngebäude von sehr großer Bedeutung und die Solarthermie liefert hierfür einen wichtigen Beitrag. Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »SpeedColl 2« hat das Fraunhofer ISE zusammen mit dem Institut für Gebäudeenergetik, Thermotechnik und Energiespeicherung (IGTE) der Universität Stuttgart sowie 13 Industriepartnern aus allen relevanten Wertschöpfungsstufen die Gebrauchsdauer und Nachhaltigkeit von solarthermischen Kollektoren, Komponenten und Materialien untersucht. Der Forschungsschwerpunkt lag dabei auf dem Einsatz in unterschiedlichen, auch extremen, Klimaten und Exportmärkten. Zudem wurde die Nachhaltigkeit der Produkte anhand des ökologischen Fußabdrucks unter Berücksichtigung ihrer Lebensdauer untersucht.

Die intensive Zusammenarbeit ermöglichte erstmals einen umfassenden Blick auf die Degradationsprozesse und ihre relevanten Einflussfaktoren. Das Projekt baute auf dem Projekt »SpeedColl« auf und umfasste das Monitoring und die Untersuchung der Degradationsvorgänge in Solarkollektoren über insgesamt fast zehn Jahre – ein immenser Erkenntnisgewinn und Meilenstein für die Industrie. Die Ergebnisse lassen erstmals eine Aussage über die zu erwartende Lebenszeit von Kollektoren und einzelnen Komponenten in Bezug auf verschiedene Einflussparameter wie hohe Temperaturen, UV-Strahlung, Feuchte oder salzhaltige Atmosphäre zu. Mithilfe der entwickelten Verfahren zur Prüfung, Charakterisierung und Simulation gelang es, eine Beziehung zwischen den

klimatischen Einsatzbedingungen und ihren Auswirkungen auf die Eigenschaften der Prüflinge herzustellen und eine Aussage über die Gebrauchsdauer und reale Alterung zu treffen. Auf dieser Basis haben wir Prüfverfahren für verschiedene Regionen, insbesondere für das Belastungskollektiv Salz-Sand-Feuchte in maritimen Regionen, entwickelt. So kann die Lebensdauer und somit auch die Beständigkeit der Sonnenkollektoren in spezifischen klimatischen Verhältnissen und Zielmärkten abgesichert werden.

Die oben genannten Ergebnisse geben der Solarindustrie wertvolle Aufschlüsse über die zu erwartende Lebensdauer sowie etwaige Schwachstellen und liefern einen wichtigen Beitrag für die Entwicklung langlebiger und qualitativ hochwertiger Solarkollektoren. Darüber hinaus hat die Analyse der Kollektoren und ihrer Komponenten an Standorten mit extremen Belastungen (Wüstenklima, korrosives Seeklima, alpines Klima, tropisches Klima) ergeben, dass die untersuchten qualitativ hochwertigen Produkte keine oder nur geringe Degradationseffekte zeigen. Ihre dauerhafte Leistungsfähigkeit in moderaten Klimaten, auch über mehrere Jahrzehnte, kann deshalb als gesichert betrachtet werden. Die neu entwickelten Methoden für die Ermittlung des ökologischen Fußabdrucks ermöglichen eine Einschätzung der Nachhaltigkeit der Produkte – und somit auch des ökologischen Fußabdrucks der bereitgestellten Wärme über die Lebensdauer der Produkte. Die Definition eines neutralen Referenzkollektors erlaubt zudem den Vergleich einzelner Produkte mit dem aktuellen Stand der Technik.



*Teststand auf der Zugspitze in kaltgemäßigem Hochgebirgsklima mit Prüflingen aus dem Projekt.*

### Kontakt

Dr. Karl-Anders Weiß  
Telefon +49 761 4588-5474  
contact@speedcoll2.de

## Gewinnung von Rohstoffen aus Geothermalwässern

Der Norden Chiles gilt als eines der trockensten Gebiete der Erde, verfügt aber über umfangreiche Geothermieressourcen. Mit neuartigen »Kombikraftwerken« könnte dort zukünftig nicht nur klimafreundlich Strom erzeugt werden, sondern auch die Gewinnung von Frischwasser und Bodenschätzen voranschreiten. Zwölf der weltweit als »kritisch« betrachteten Rohstoffe wie Rubidium, Cäsium oder Bor können in dieser Region in Geothermalquellen angereichert und gewonnen werden. Von besonderem Interesse sind hierbei die Lithiumressourcen, die für die Umsetzung der Energiewende dringend benötigt werden. In dem 2019 gestarteten und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierten deutsch-chilenischen Forschungsprojekt »BrineMine« werden deshalb Explorationen zur Bewertung der chilenischen Ressourcen durchgeführt sowie Extraktionstechnologien entwickelt und im Feld erprobt.



### Kontakt

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

*Versuchsanlage in Insheim zur Ausfällung von Störstoffen wie Kalzium und Silikaten sowie zur Aufkonzentration der geothermalen Sole.*



*Kontinuierliche Ausschleusung der Fällprodukte durch den Bandfilter der Anlage.*

Am Fraunhofer ISE entwickeln, konstruieren und bauen wir im Rahmen des Projekts die Anlagentechnik für die Aufkonzentration der geothermalen Solen und die Extraktion von Mineralien (Abb. links). Die für den Einsatz in Chile entwickelte Technologie basiert auf einer neuartigen Kombination verschiedener Verfahren: Zunächst wird die Wärme aus der geothermalen Sole, wie bisher auch, energetisch zur Stromerzeugung genutzt. Die so auf ein Abwärmenniveau von ca. 60°C abgekühlte und noch schwach konzentrierte Sole führen wir anschließend durch einen chemischen Fällungsreaktor, wo sie von Störstoffen wie Silikaten befreit und anschließend weiter abgekühlt wird (Abb. oben). Die Konsistenz des Fällungsschlammes ist dabei abhängig von den eingestellten Fällungsbedingungen. Auf einem Temperaturniveau von ca. 25°C erfolgt dann eine Vorkonzentration mithilfe einer druckgetriebenen Umkehrosmoseanlage. Dabei wird gleichzeitig auch der größte Teil des Frischwassers gewonnen. Anschließend konzentrieren wir das Solekonzentrat durch Membrandestillation bis an die Sättigungsgrenze auf. Die dazu erforderliche thermische Energie liefert die Abwärme. In dem darauf folgenden Prozess können schließlich Mineralien wie Lithium gewonnen und extrahiert werden.

Die Gewinnung von Rohstoffen aus geothermalen Solen ist nicht nur für Chile, sondern auch für Deutschland und weitere Länder von steigendem wirtschaftlichen und rohstoffstrategischen Interesse. So konnte das Fraunhofer ISE zusammen mit den »BrineMine«-Projektpartnern erfolgreich eine erste Versuchsanlage im Geothermiekraftwerk der »Pfalzwerke geofuture GmbH« im Oberrheingraben bei Insheim testen und so die Funktion der neuen Verfahrenskette erfolgreich demonstrieren (Abb. links). In Kooperation mit unseren Industriepartnern planen wir nun in einem nächsten Schritt den Aufbau und die Inbetriebnahme der Versuchsanlage an einem Geothermiestandort in Chile mit dem Ziel einer anschließenden Hochskalierung und Kommerzialisierung.



## »SinoTrough« – ein optimierter Parabolrinnenkollektor für den chinesischen Energiemarkt

Der Bedarf an erneuerbaren Stromquellen, die Tag und Nacht verfügbar sind und Schwankungen im Stromnetz ausgleichen können, ist in den letzten Jahren stark gestiegen. Diese Entwicklung ist weltweit zu verzeichnen, besonders aber für China relevant. Solarthermische Kraftwerke (Concentrated Solar Power, CSP) mit thermischem Speicher bieten hierfür eine nachhaltige Lösung.

In dem deutsch-chinesischen Projekt »SinoTrough«, das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird, arbeitet das Fraunhofer ISE gemeinsam mit der sbp sonne gmbh und der Royal Tech CSP Limited an einem Kollektorsystem, das die Effizienz und Zuverlässigkeit der Technologie weiter steigern und dabei zugleich die Produktionskosten senken soll. Ziel ist, einen innovativen Parabolrinnenkollektor zu entwickeln, der den Anforderungen des chinesischen Energiesystems entspricht. Das Projekt berücksichtigt daher besonders die erforderliche Widerstandsfähigkeit gegenüber den rauen Umweltbedingungen im Nordwesten Chinas sowie die Gegebenheiten des chinesischen Markts. Dazu untersucht das Fraunhofer ISE über technische Fragestellungen hinaus auch die sozioökonomische Akzeptanz und bindet die relevanten Gemeinden und Interessengruppen aktiv in den Prozess ein. Die Studie bietet Investoren und politischen Entscheidungsträgern weitere wichtige Perspektiven, um den Wert von CSP-Projekten zu analysieren und zu verstehen.

Vor diesem Hintergrund werden derzeit zwei Online-Umfragen durchgeführt: Eine Studie zur Marktakzeptanz richtet sich an die Hauptakteure der CSP-Lieferkette in China aus Planung, Beschaffung und Bau sowie an Komponentenhersteller und

Investoren. Außerdem adressiert ein Fragebogen zur Akzeptanz die Anwohner in der Inneren Mongolei, Gansu und der Provinz Qinghai. Die Methode der Input-Output-Analyse und das »Jobs and Economic Development Impacts Model for Concentrating Solar Power« dienen als Grundlage für die Bewertung der potenziellen wirtschaftlichen Auswirkungen des Projekts.

Die Primäranalyse zeigt, dass eine 50 MW-Demonstrationsanlage mit SinoTrough-Technologien im Jahr 243 Arbeitsplätze schaffen könnte – davon 44 vor Ort, 77 in der Lieferkette und 122 als induzierte Effekte während des Betriebs. Während der 25-jährigen Betriebsdauer könnten durch die Anlage in Summe rund 432 Millionen USD an Wirtschaftsleistung generiert werden.

Um den Weg für einen höheren Anteil an erneuerbaren Energien im zukünftigen Energiesystem zu ebnen, haben wir die Voraussetzungen in einer Modellregion in China analysiert. Mit den Simulationswerkzeugen »ENTIGRIS« und »ColSimCSP« des Fraunhofer ISE wurde dazu das Potenzial dieser Technologie, die durch thermische Speicher bedarfsgerecht Strom erzeugen kann, für eine langfristige Stärkung des chinesischen Stromnetzes ermittelt. Im Ergebnis haben wir durch eine Bewertung der technischen Potenziale geeignete Gebiete für die Installation von CSP in China identifiziert, die überwiegend in nordwestlichen und nördlichen Regionen liegen. Die Notwendigkeit zum Ausbau der überregionalen Übertragungsnetze und der installierten Kapazitäten erneuerbarer Energien haben wir zudem in einem Referenzszenario sowie einem Szenario mit hohem Anteil erneuerbarer Energien ermittelt.

*100 MWe-Parabolrinnenkraftwerk in Urat, Innere Mongolei, China, entwickelt von der sbp sonne gmbh und der Royal Tech CSP Limited.*



### Kontakt

Dr. Gregor Bern  
Telefon +49 761 4588-5906  
soltherm.collectors@ise.fraunhofer.de

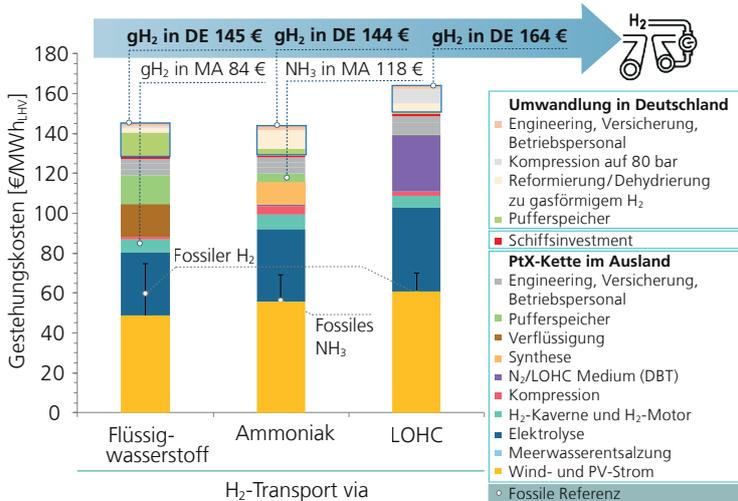
# Ökonomische und ökologische Bewertung großskaliger Wasserstoff- und Power-to-Liquid-Szenarien

Die Erzeugung und Bereitstellung von wasserstoffbasierten Energieträgern über den Power-to-X-Ansatz (PtX) ist ein zentraler Schritt zur Defossilisierung von Volkswirtschaften weltweit. Hierbei ergibt sich in aktuellen Energiesystemanalysen nicht nur für Deutschland ein PtX-Bedarf in der Größenordnung von mehreren Hundert Terawattstunden bis zum Jahr 2040 bzw. 2050, sondern für zahlreiche Volkswirtschaften auf der ganzen Welt. Besonders die Petrochemie und Stahlindustrie, aber auch der Schwerlastverkehr sowie die Schiff- und Luftfahrt werden in hohem Maße auf diese importierten synthetischen Energieträger angewiesen sein. Aus diesem Grund ist es von zentraler Bedeutung, den Aufbau und die Nutzung von PtX-Erzeugungs- und Transportketten möglichst kosten- und umwelteffizient sowie sozial gerecht auszugestalten.

Am Fraunhofer ISE führen wir ganzheitliche Life Cycle Assessments (LCA) verschiedener PtX-Szenarien mit einem klaren Fokus auf Ökonomie und Ökologie durch. Die vielfältigen Analysen reichen hierbei von detaillierten Well-to-Wheel-Analysen für neuartige synthetische Kraftstoffe über techno-ökonomische Betrachtungen großskaliger PtX-Konzepte an global verteilten Standorten bis hin zur LCA-Analyse zukünftiger Energiesysteme.

In einer aktuellen Untersuchung haben wir für das Jahr 2030 die Effizienz und die Gestehungskosten verschiedener H<sub>2</sub>-Transportszenarien bei Erzeugung in Marokko und nachfolgendem Schiffstransport nach Deutschland verglichen. Die Studie betrachtet u. a. die H<sub>2</sub>-Transportoptionen für verflüssigten Wasserstoff, Ammoniak und LOHC (Liquid Organic Hydrogen Carrier). Bei der Auslegung der PtX-Systeme wurde Wert auf vollständig defossilisierte Prozesse gelegt, weshalb die gesamte PtX-Kette über erneuerbare Energien versorgt wird und keine fossilen Energieträger zum Einsatz kommen. Für die Analysen kam, neben GIS-basierten Standortanalysen, die am Fraunhofer ISE entwickelte Toolbox »PtX-ProSim« zum Einsatz, die es ermöglicht, PtX-Pfade in hoher zeitlicher Auflösung zu simulieren und hinsichtlich Anlagenauslegung und -betrieb zu optimieren.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Erzeugungskosten für den erneuerbaren Strom aus Wind- und PV-Anlagen sowie die Kosten für die hier betrachtete PEM-Elektrolyse (420–480 MW<sub>el</sub>) in allen Szenarien den Großteil der finalen H<sub>2</sub>-Bereitstellungskosten ausmachen. Die Bereitstellung von Wasser über die Meerwasserentsalzung durch Umkehrosmose stellt hingegen keinen relevanten Kostenfaktor dar. Von zentraler Bedeutung für weitere nennenswerte Reduktionen der PtX-Gestehungskosten erweisen sich vielmehr Faktoren wie eine möglichst hohe Volllaststundenzahl bei den erneuerbaren Energien, ein effizienter Elektrolyseprozess, eine Serienfertigung von Hardwarekomponenten für die Elektrolyse sowie die Flexibilisierung von Syntheseprozessen.



*Bereitstellungskosten (Erzeugung und Schiffstransport) in Deutschland (DE) für grünen gasförmigen Wasserstoff (auf 80 bar Druck), importiert aus Marokko (MA) über drei Transportoptionen im Jahr 2030.*

## Kontakt

Christoph Hank  
 Telefon +49 761 4588-2247  
 h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de

*Synthetische Energieträger über den Power-to-X-Pfad sind ein Schlüsselement zur tiefgreifenden Defossilisierung globaler Volkswirtschaften.*



## Wasserstoff-Qualitätsmessung unter Realbedingungen an PKW-Tankstellen

*Eichstand der Hochschule Offenburg zum Kalibrieren und Testen von Durchflusssensoren an der Wasserstoff-Tankstelle des Fraunhofer ISE.*

Wasserstoff als umweltfreundlicher Kraftstoff ist ein wesentlicher Baustein der Verkehrswende. Das Fraunhofer ISE ist seit 2012 Besitzer und Betreiber einer der ersten Wasserstoff-Tankstellen Europas. Es handelt sich dabei um eine Forschungsplattform, die zugleich der Öffentlichkeit als Betankungsanlage zur Verfügung steht. Ein eigener Elektrolyseur zur Wasserstoffgewinnung stellt eine weitere Besonderheit dar. Das Fraunhofer ISE verfügt somit über einen zehnjährigen Erfahrungsschatz in Errichtung, Betrieb und Wartung der Tankstellentechnik, der in zahlreiche Projekte – u. a. zur Testung von Komponenten – einfließt. Wir bieten mit unserer Wasserstoff-Tankstelle eine einzigartige Testplattform in der Erprobung unter Realbedingungen. Tests können sowohl während des Tankstellen-Normalbetriebs als auch – wenn erforderlich – unter Abschaltung der öffentlichen Betankung erfolgen. In der jüngsten Vergangenheit haben wir beispielsweise Mikrofilter im Dispenser erprobt und die Ergebnisse mit Analysen aus früheren Forschungsprojekten verglichen. Diese Filter verhindern das Einbringen von kleinsten Partikeln in den Fahrzeugtank und eliminierten Probleme früherer Filtergenerationen. Darüber hinaus haben wir in enger Zusammenarbeit mit der Hochschule Offenburg mehrere Durchflusssensoren vom Prototyp bis hin zum eichfähigen Produkt getestet.

Im Frühjahr 2021 konnte das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Forschungsprojekt »HAIMa« erfolgreich abgeschlossen werden, in dessen Rahmen wir einen von Grund auf neu entwickelten Wasserstoffqualitätssensor unter Realbedingungen getestet haben. Das Ziel des Konsortiums war, eine kostengünstige, massentaugliche und vollautomatisierte Messlösung zur Überwachung der Wasserstoffqualität gemäß den Normen SAE J 2719 und ISO 14687-2 zu entwickeln und unter Realbedingungen zu testen. Eine große Herausforderung an die Wasserstoffreinheit und das Messsystem sind dabei die sehr geringen



zugelassenen Maximalkonzentrationen von z. B. 0,2 ppm bei Kohlenmonoxid. Der vom Industriepartner Hydac und der ZeMA gGmbH entwickelte Prototyp eines Sensors misst nach dem infrarotspektrometrischen Prinzip. Zur Erweiterung der Detektionsgrenze und Erfassung von homonuklearen Molekülen, z. B. Stickstoff  $N_2$ , macht sich der Sensor den an Wasserstoff-Tankstellen hohen Druck zunutze. Messungen unter Bedingungen von bis zu 900 bar lieferten vielversprechende Ergebnisse. Zur Validierung der Laborergebnisse kontaminierte das Fraunhofer ISE die Wasserstoff-Tankstelle in zwei Messkampagnen gezielt mit Schadgasen und verglich die Messergebnisse des Sensors mit den Messergebnissen durch ein externes Analyzelabor. Die Ergebnisse zeigten zwar Abweichungen zwischen Realbedingungen und Labormessungen, waren jedoch so vielversprechend, dass der Prototyp nun vom Industriepartner weiterentwickelt wird.

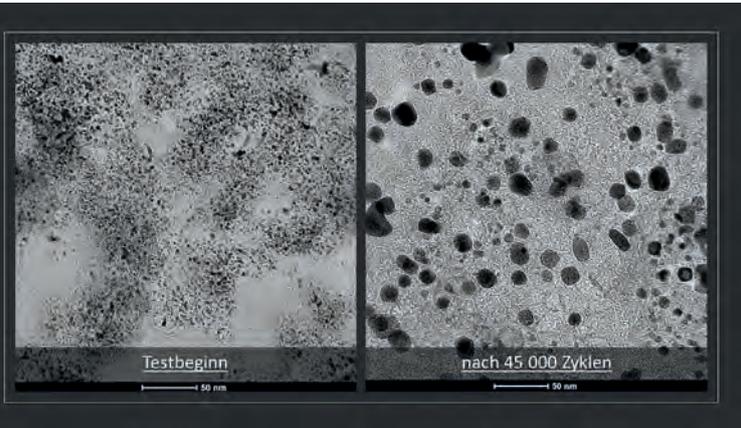


### Kontakt

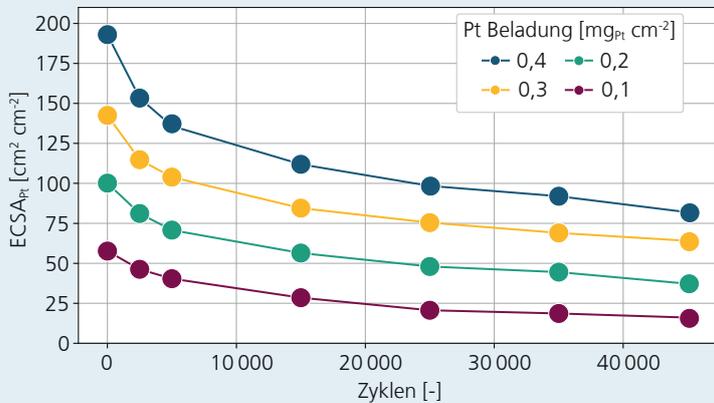
*Wasserstoffqualitätssensor (rechts), angeschlossen an die 900 bar-Hochdruckspeicher der Wasserstoff-Tankstelle (links).*

Christopher Voglstätter  
Telefon +49 761 4588-5357  
h2fc.electrolysis@ise.fraunhofer.de

# Einfluss der Platinbeladung auf die Langzeitstabilität von Brennstoffzellen



TEM-Aufnahmen von Platin-Nanopartikeln einer nicht gealterten (links) und einer über 45 000 Potenzialzyklen gealterten Kathode (rechts).



ECSA-Verläufe über 45 000 Potenzialzyklen zwischen 0,6 und 0,95 V für verschiedene Platinbeladungen.

Die Langzeitstabilität von automobilen Brennstoffzellen steht aufgrund ihrer dynamischen Betriebsweise im Fokus aktueller Forschungen. Der Verlust von Platin in seiner Funktion als Katalysator ist dabei für den Leistungsverlust über die Betriebszeit einer Zelle besonders entscheidend.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) geförderten Projekts »OREO« haben wir am Fraunhofer ISE die Einflüsse auf die Degradation des Katalysators näher untersucht. Dazu haben wir Membran-Elektroden-Einheiten (MEA) mit unterschiedlichen Kathodenbeladungen zwischen 0,1 und 0,4 mg<sub>Pt</sub>/cm<sup>2</sup> produziert und ihre Leistung und Stabilität elektrochemisch charakterisiert. Im Rahmen der Charakterisierung kam ein beschleunigter Alterungstest zum Einsatz, bei dem die Zellen 45 000 Potenzialzyklen im kritischen Betriebsbereich zwischen 0,6 und 0,95 V ausgesetzt waren, um ihre Stabilität quantifizieren zu können. Hierzu wurde eine Vielzahl elektrochemischer Methoden angewendet, die unter anderem Rückschlüsse auf das Leistungsverhalten bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen sowie auf die aktive Platinoberfläche, den Protonentransport und die Sauerstoffdiffusion in Abhängigkeit von der fortschreitenden Degradation zulassen.

Die Grafik zeigt den Verlauf der elektrochemisch aktiven Oberfläche (ECSA), die für alle gemessenen Platinbeladungen mit steigender zyklischer Beanspruchung abnimmt. Ursachen hierfür sind wachsende Platinpartikel durch die Auflösung von Platin an kleinen Partikeln und ihre Wiederanlagerung an großen Partikeln (Ostwald-Reifung) sowie eine diffusionsgetriebene Migration von Platin-Ionen aus der Elektrode. Im relativen Vergleich der einzelnen Verläufe zeigt sich hierbei ein erhöhter Verlust der ECSA für niedrigere Beladungen, da der diffusionsgetriebene Verlust verhältnismäßig hoch ausfällt.

In Zusammenarbeit mit der University of Connecticut wurde der ECSA-Verlust mithilfe der Transmissionselektronenmikroskopie (TEM) bildgebend analysiert. Die aus allen Aufnahmen ermittelten Partikelgrößenverteilungen zeigen dabei stärker wachsende Partikel für niedrigere Platinbeladungen. Weiterhin konnte der mit sinkender Platinbeladung zunehmende diffusionsgetriebene Verlust durch flächenhafte Elementaranalysen bestätigt werden.

## Kontakt

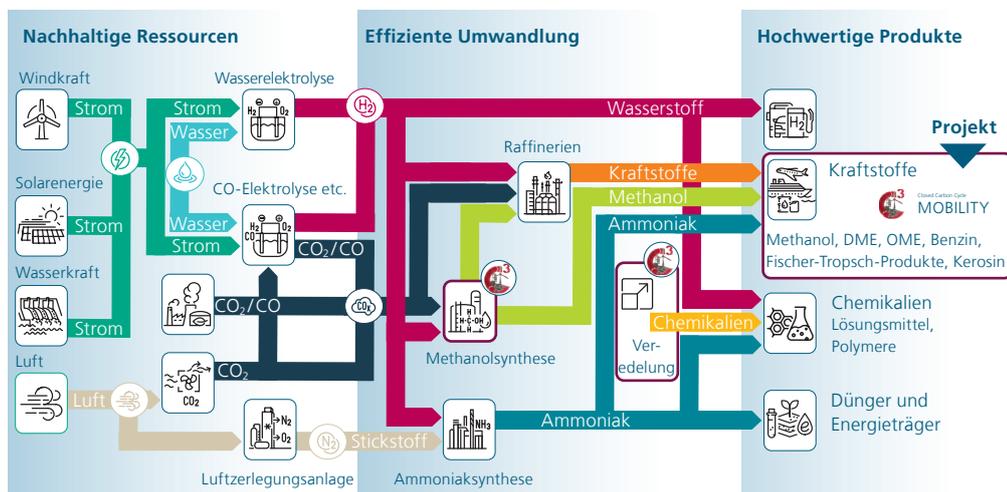
Patrick Schneider  
 Telefon +49 761 4588-2450  
 h2fc.systems@ise.fraunhofer.de

# C<sup>3</sup>-MOBILITY – klimaneutrale Kraftstoffe für den Verkehr der Zukunft

C<sup>3</sup>-Mobility ist einer von fünfzehn Forschungsverbänden der Forschungsinitiative »Energiewende im Verkehr« des Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und vereint dreißig Partnern aus Industrie und Wissenschaft. C<sup>3</sup>-Mobility verfolgt das Ziel, mithilfe synthetischer Kraftstoffe auf Methanolbasis neue Wege in eine CO<sub>2</sub>-freie Mobilität aufzuzeigen. Gerade für Langstrecken und große Transportvolumen sind synthetische Kraftstoffe ein attraktiver, zukunftsweisender Lösungsansatz.

Ausgangspunkt der Forschung ist die Weiterverarbeitung von Methanol zu neuen strombasierten Kraftstoffen für Benzin- und Dieselmotoren. Dazu zählen etwa Methanol-to-Gasoline (Methanol zu Benzin, MtG) sowie mittel- und langkettige Alkohole und Ether. Die Entwicklung neuer Kraftstoffsyntheseverfahren und Verbrennungskonzepte wird durch interdisziplinäre Untersuchungen zu Materialverträglichkeit, Kraftstoffstabilität, Abgasnachbehandlung und Kraftstoffsensorik begleitet. Die Fahrzeugtauglichkeit der innerhalb des Projekts hergestellten neuen Kraftstoffe wird unter realen Fahrbedingungen überprüft. Die Anwendungen erstrecken sich dabei vom Pkw-Bereich über leichte Nutzfahrzeuge bis hin zu schweren Nutzfahrzeugen. Insgesamt werden acht Demonstrationsfahrzeuge aufgebaut. Die Projektergebnisse münden in eine ganzheitliche Bewertung. Diese berücksichtigt die Synthesewege und die Motorentechnologie einschließlich Effizienz und Schadstoffemissionen ebenso wie die Übereinstimmung neuer Energieträger mit der heutigen Kraftstoffgesetzgebung und möglichen Kraftstoffmischstrategien.

*Einordnung des C<sup>3</sup>-Mobility-Projekts in das Power-to-Liquid-Schema des Fraunhofer ISE.*



*Der CatVap®-Prototyp wurde mit strombasierten Kraftstoffen betrieben, um CO<sub>2</sub> und sekundäre Emissionen zu reduzieren.*



Am Fraunhofer ISE untersuchen wir im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten [Projekts](#) die Anwendung der Kraftstoffaufbereitungstechnologie CatVap® in der Abgasnachbehandlung von überstöchiometrisch betriebenen Motoren. Dafür haben wir zunächst das Verhalten von synthetischen Kraftstoffen auf einem Oxidationskatalysator analysiert. Der Fokus lag auf der Interaktion mit herkömmlichen Kraftstoff- und Abgaskomponenten sowie auf der Abgasnachbehandlung bei Kaltphasen des Motorenbetriebs. Die Versuche ergaben, dass für synthetische Etherkraftstoffe am Oxidationskatalysator Temperaturen über 160°C erforderlich sind, um die Bildung von giftigem Formaldehyd zu verhindern. Diese Temperatur kann durch den Einsatz des vorgeschalteten CatVap®-Systems (Abb. oben) bereits wesentlich früher erreicht werden. Zudem haben wir an einem Motorenprüfstand in einem Kaltstart-Stadt-Zyklus gezeigt, dass das nachgeschaltete, selektive katalytische Reduktionssystem (SCR) zur Entfernung von Stickoxiden nach 150 Sekunden aktiv werden konnte. In Referenzversuchen ohne CatVap® waren 510 Sekunden erforderlich. Die Technologie bietet daher ein hohes Potenzial, Sekundäremissionen entsprechend der ab 2025 geplanten Euro 7 Abgasnorm zu reduzieren.

## Kontakt

Florian Rümmele  
 Telefon +49 761 4588-5365  
 h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de

## Batterieforschung entlang der gesamten Wertschöpfungskette



*Batterie  
satz in  
indern,  
, System-  
lungskosten  
urden.*

Unter den bekannten Konzepten für stationäre Speicher sind Batterien mit wässrigen Elektrolyten, darunter moderne wiederaufladbare Zink-Ionen-Batterien, von besonderem Interesse. Die verwendeten Zellchemien versprechen niedrige spezifische Kosten sowie eine hohe Betriebssicherheit. Die hohe Verfügbarkeit der Materialien (hier: Zink, Manganoxid, Edelstahl) trägt zudem zur Nachhaltigkeit der Technologie bei.

Am Fraunhofer ISE haben wir auf diesem Forschungsgebiet wegweisende Fortschritte im Verständnis des Reaktionsmechanismus erzielt, wobei besonders die [Rolle des pH-Werts im wässrigen Elektrolyten](#) weiter aufgeschlüsselt wurde. Auf diesen Erkenntnissen aufbauend, evaluieren wir derzeit verschiedene Elektrolyt-Additive zur gezielten Optimierung des Zyklieverhaltens.

Im Projekt »INFAB«, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert wird, entwickeln wir derzeit gemeinsam mit mehreren Industriepartnern ein Zink-

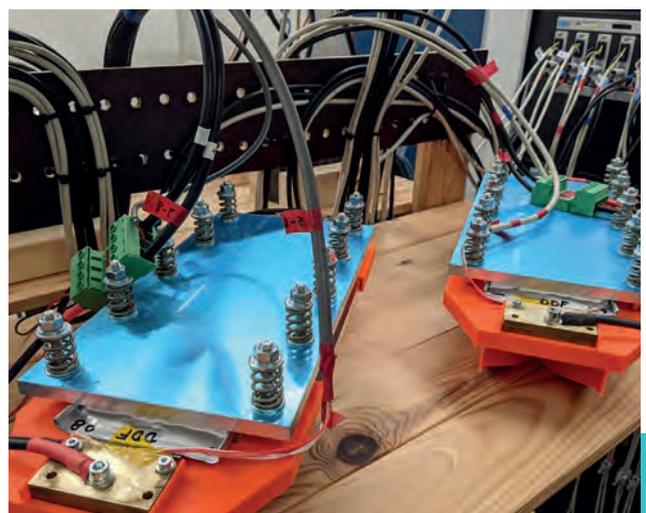
Ion-Batteriesystem mit wässrigem Elektrolyten. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ausgeschriebenen Wettbewerbs »Sprunginnovation – Weltspeicher« haben wir außerdem eine spezifische Variante der Zink-Ionen-Speichertechnologie für den Einsatz in Entwicklungs- und Schwellenländern konzipiert (Abb. links).

Assemblierte Lithium-Ionen-Batteriezellen müssen im letzten Fertigungsschritt formiert und im sogenannten »Ageing«-Prozess auf ihre Qualität geprüft werden. Hier bringt das Fraunhofer ISE seine Kenntnisse für die Spezifikation einer Linie im Produktionsmaßstab für Zellen im Format 21700 sowie einer Forschungsanlage für großformatige Pouchzellen im Projekt [»Forschungsfertigung Batteriezelle«](#) ein. Zellen werden im Batterielabor des Fraunhofer ISE in Industrie- sowie in Forschungsprojekten wie z. B. im vom BMWK geförderten Projekt [»DDD-BATMAN«](#) aufwendig charakterisiert (Abb. unten) und ihre Alterung modelliert. Dies ist Voraussetzung für die Entwicklung von Methoden für die datenbasierte Diagnose und Prognose von Batteriezellen, die den Gesundheitszustand (SOH) der Batteriezellen jederzeit hochgenau ermitteln können. Auf Grundlage der elektrischen und thermischen Charakterisierung entwickeln wir modellbasierte Batteriesysteme für den mobilen und den stationären Bereich. Dies umfasst kundenspezifische Auslegungen von Systemen ebenso wie die Weiterentwicklung von Batteriemanagementsystemen und innovativer Messtechnik, beispielsweise unter Einsatz von elektrochemischer Impedanzspektroskopie im Projekt [»SIMBA«](#). Im Projekt [»PLÖPPSS«](#), das durch das BMWK gefördert wird, arbeiten wir derzeit gemeinsam mit Industriepartnern an einem Prüfstand für Propagationsuntersuchungen, um die Batterietechnik noch sicherer zu gestalten.

### Kontakt

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

*Charakterisierung von  
Lithium-Ionen-Zellen  
im Batterielabor.*



## Qualitätssicherung entlang der Wertschöpfung – von der Zellproduktion bis in die Anwendung

Mit dem zunehmenden Einsatz von Batterien steigt auch die Nachfrage nach aussagekräftigen Prüfverfahren zur Bestimmung ihrer Qualität und Sicherheit. Besonders in der Elektromobilität ist ein gefahrfreier Betrieb von Batteriesystemen bei einer gleichzeitig hohen Energiedichte ein entscheidender Faktor, um das Vertrauen in die Technologie weiter zu stärken und so zum Gelingen der Verkehrswende beizutragen.

Zu diesem Zweck entwickeln Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen am Fraunhofer ISE innovative, zerstörungsfreie Prüfverfahren zur Qualitätssicherung in der Batteriezell- und Batteriemodulproduktion ebenso wie geeignete Zertifizierungsverfahren. Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt »OrtOptZelle« nutzen wir im Bereich der Prüfverfahren beispielsweise das sensorische Verfolgen von Volumenänderungen und in kommenden Projekten die ultraschallbasierte Mikroskopie. Dabei verfolgen wir das Ziel, die Sicherheit und Langlebigkeit von Batteriezellen signifikant zu erhöhen, indem wir günstige, sensitive Testmethoden etablieren und Fertigungsdefekte frühzeitig aufspüren. Dies erlaubt uns, Mängel auf Zellebene sowie im Systemaufbau frühzeitig zu identifizieren und so die Verbesserung der Batterietechnologien und -produkte aktiv mitzugestalten.

2022 eröffnen wir ein Prüflabor zur Durchführung zerstörender Tests an Batteriezellen und -modulen. Dort werden Sicherheit und Qualität von Prüflingen aller Art unter extremen Umgebungsbedingungen validiert.

Doch nicht nur im Labor, auch in der Anwendung müssen Batteriespeichersysteme ihre Qualität unter Beweis stellen und zeigen, dass sie unter komplexen Einsatzbedingungen und in Interaktion mit unterschiedlichsten Komponenten die nötige Leistung bei voller Sicherheit und Zuverlässigkeit erbringen können. Eine unabhängige Validierung der Qualität

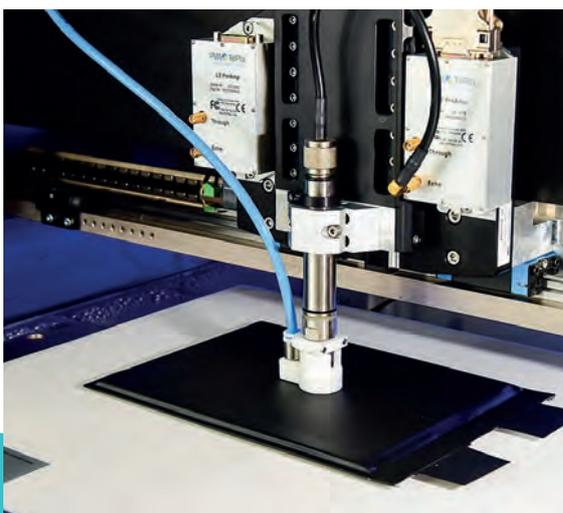


*Leistungsangebot des Fraunhofer ISE im Bereich der Qualitätssicherung von Batteriespeichersystemen in Feldanwendungen.*

und Leistungsfähigkeit von Batteriespeichern auf Systemebene sowie ihre Anwendung im Feld ist für Hersteller, Anlagenbauer und Investoren von höchster Relevanz. Die Speichersysteme können hierbei von kleinen autarken Solar-Home-Systemen über Mobilitätsanwendungen bis hin zu großen MWh-Speichern zur Netzstabilisierung reichen.

Auch an diesen Fragestellungen zur Qualitätssicherung über den gesamten Projektlebenszyklus forschen wir. Dazu entwickeln wir neue Methoden zur simulationsbasierten Auslegung von Batteriespeichern sowie zur Optimierung des Systemdesigns inklusive aller Komponenten von der Leistungselektronik bis hin zur Integration des Energiemanagements.

Diese Methoden finden in verschiedenen Bereichen Anwendung, etwa bei der optimierten Integration von Batteriespeichern in PV-Kraftwerke, Anlagenprüfungen und Validierungen oder beim Qualitätsmonitoring. Unsere Experten erstellen hierfür hochwertige technische und techno-ökonomische Analysen, die Investitionsrisiken frühzeitig identifizieren und gegebenenfalls auch abwenden können.



*Zerstörungsfreie Charakterisierung einer Batteriezelle mit Ultraschallwellen.*

### Kontakt

Adrian Heuer  
Telefon +49 761 4588-5220  
batteries.testing@ise.fraunhofer.de

## Reallabor EnStadt:Pfaff – ein klimaneutrales Quartier für die Zukunft



3D-Modell des Pfaff-Quartiers.

Die Komplexität künftiger Energiesysteme erfordert neue Lösungsansätze in realer Umgebung. Reallabors sind kleinräumige Projektkontexte, in denen konkrete Konzepte und Entscheidungshilfen in Kooperation mit Praxispartnern entwickelt, implementiert und erprobt werden. Sie ermöglichen die umfassende Untersuchung und Optimierung des Energiesystems und seiner Komponenten in Abhängigkeit der vorhandenen Regulatorik und möglicher Geschäftsmodelle. Die Arbeiten erfolgen unter umfassender Einbindung der Bevölkerung.

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) und das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) fördern gemeinsam seit Oktober 2017 das als Reallabor angelegte Leuchtturmprojekt »EnStadt:Pfaff«. Ziel ist ein integriertes Konzept zur Erreichung der Klimaneutralität auf dem ehemaligen Gelände der Nähmaschinenfabrik Pfaff

in Kaiserslautern. Auf 18 Hektar entsteht ein Mischquartier für 1 400 Bewohner mit 3 200 Arbeitsplätzen. Acht Partner aus Wirtschaft und Wissenschaft arbeiten unter Leitung der Stadt Kaiserslautern zusammen, um eine zukunftsfähige Ausrichtung des Quartiers zu erreichen. Die wissenschaftliche Leitung liegt beim Fraunhofer ISE.

Voraussetzung für das Erreichen der Klimaneutralität ist eine entsprechende Rahmensetzung durch die Kommune, die im Wesentlichen in der Phase der Bauleitplanung erfolgt und sowohl ökonomische als auch rechtliche Aspekte einbezieht. EnStadt:Pfaff begleitet den Prozess fachlich und hat hierfür wegweisende Konzepte für Energieversorgung und Mobilität sowie Informations- und Kommunikationstechnologie erarbeitet. Auf dieser Basis wurde bundesweit erstmalig eine Solarpflicht in Kombination mit einer obligatorischen Dachbegrünung in den Bebauungsplan aufgenommen. Die Wärmeversorgung erfolgt mithilfe industrieller Abwärme aus einer benachbarten Gießerei. Zur Erreichung eines autoarmen Quartiers wurde eine Stellplatzsatzung beschlossen, die den Bau von Mobilitätsstationen ermöglicht.

Für die Umsetzungsphase entwickelt das Fraunhofer ISE im Rahmen von EnStadt:Pfaff Technologien wie z. B. ein agentenbasiertes Energiemanagementsystem auf Basis der Blockchain-Technologie. Darüber hinaus werden Batterietechnologien auf ihre Praxistauglichkeit hin untersucht und eine gestalterisch angepasste, hocheffiziente PV-Fassade sowie Ladeinfrastrukturlösungen für Elektrofahrzeuge konzipiert und umgesetzt. Die Digitalisierung spielt für klimaneutrale Quartiere sowohl in der Planung als auch in der Bereitstellung von Dienstleistungen für künftige Bewohner und Nutzer eine wichtige Rolle, hierzu entwickeln wir eine digitale Datenplattform und ein 3D-Modell des Quartiers.

Das Projekt EnStadt:Pfaff bietet mit seinem »geschützten Raum« ideale Bedingungen, um technische, wirtschaftliche, soziale und regulatorische Innovationen und Prozesse zu erproben. Im Rahmen der sozialwissenschaftlichen Begleitung durch das Fraunhofer ISE werden diese auch in ihren Wechselwirkungen untersucht. Dazu erarbeiten wir ein Werkzeug, das die Bewertung neuer Technologien in Hinblick auf die Lebensqualität ermöglicht. Beantwortet werden soll auch die Frage, wie sich höhere Anforderungen an den Klimaschutz auf das Verhalten möglicher Investoren in einem Quartier auswirken.

### Kontakt

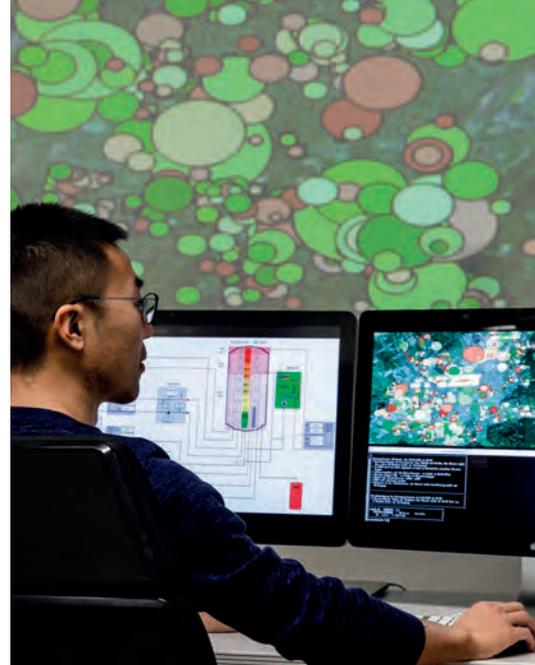
Gerhard Stryi-Hipp  
Telefon +49 761 4588-5686  
energysystem.analysis@ise.fraunhofer.de

# Künstliche Intelligenz für Netzbetrieb und Netzplanung

Elektrische Verteilnetze müssen zukünftig neue Versorgungsaufgaben erfüllen. Netzbetreiber stehen daher vor der Herausforderung, eine Vielzahl an Erzeugungsanlagen und Verbrauchern in ihren Datenbanken nachzupflegen, um diese im Netzbetrieb zu berücksichtigen. Zudem ändern Elektrofahrzeuge als mobile Verbraucher regelmäßig ihren Anschlusspunkt und damit auch ihre Wirkung auf das Stromnetz. Gleichzeitig sind die Verteilnetze nicht voll digitalisiert und bieten aufgrund ihrer komplexen Struktur nur eine geringe Beobachtbarkeit. An dieser Stelle setzen Verfahren zur Zustandsschätzung ein, um wichtige Daten für den Netzbetrieb und die Netzplanung zu generieren.

Mithilfe der künstlichen Intelligenz entwickelt das Fraunhofer ISE neue Algorithmen, um die klassischen Methoden der Zustandsschätzung zu verbessern. Verwendet werden sogenannte »Graph Neural Networks« (GNNs). Der Hauptvorteil dieser neuronalen Netze liegt darin, dass sie Strukturinformationen über die sogenannte »Adjazenzmatrix« der Netztopologie im Trainingsprozess ausnutzen und mit verschiedensten Datenquellen intelligent verknüpfen. So kann auch mit wenigen Datenpunkten eine gute Zustandsschätzung des Netzes erreicht werden. Für den Betrieb der Netze entwickeln und erproben wir im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt »A14Grids« Verfahren, um neue Verbraucher zu erkennen. Ziel ist, die beim Netzbetreiber vorhandenen Daten zu nutzen, um die Betriebsführung beispielsweise bei Engpässen zu verbessern.

*Erzeugungsleistungen in der Leitwarte des Digital Grid Lab.*



Darüber hinaus helfen die gewonnenen Daten bei der Netzplanung. Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »StraZNP« werden die neuen Betriebsmittel in Kombination mit generierten Zeitreihen genutzt, um eine neue Versorgungsaufgabe zu bestimmen und für diese ein optimales Netz zu planen. Gemeinsam mit verschiedenen Verteilnetzbetreibern führen wir dazu eine automatisierte spannungsebenen-übergreifende Zielnetzplanung durch, die neue Anschlussnehmer kostenoptimal in das Netz integriert. Das Ziel dieser Arbeiten besteht darin, die zukünftige Belastung der Netze durch neue Verfahren besser abschätzen zu können und somit die Netzplaner zu unterstützen.

Für die zuvor beschriebenen Verfahren sind Funktions- und Validierungstests erforderlich, bevor sie zur Anwendung kommen. Hierzu betreibt das Fraunhofer ISE das [Digital Grid Lab](#), in dem wir auf hochmodernen Hardware-in-the-Loop-Computern »digitale Zwillinge« von Stromnetzen betreiben. Gekoppelt mit einer Leitwarte und Leistungsverstärkern steht hier eine realitätsnahe Systemumgebung für Integrationstests bereit.



*Visualisierung des Netzzustands in einem exemplarischen Verteilnetz mit neu angeschlossenen E-Fahrzeugen, die durch die Zustandsschätzung detektiert werden.*

## Kontakt

Dr. Bernhard Wille-Haußmann  
Telefon +49 761 4588-5443  
digital-grid-lab@ise.fraunhofer.de

## Hochkompakter Wechselrichter zur Direktanbindung an das Mittelspannungsnetz

Im Zuge der Energiewende gewinnt der Ausbau der Stromnetze an Bedeutung. Immer mehr regenerative Erzeugungsanlagen sowie elektrische Speicher werden an das Netz angeschlossen. Die Leistungselektronik spielt dabei eine entscheidende Rolle, weil sie zur Ankopplung dieser Systeme an das Netz notwendig ist. Neben der reinen Einspeisung bzw. Rückspeisung von elektrischer Energie muss die Leistungselektronik aber noch weitere netzstützende Aufgaben übernehmen. Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Verbundprojekt »SiC-MSBat« haben Forscher des Fraunhofer ISE nun gemeinsam mit anderen Partnern einen hochkompakten Wechselrichter zur direkten Einspeisung in das Mittelspannungsnetz entwickelt und erfolgreich in Betrieb genommen.

Aktuell speisen Wechselrichter meist in das Niederspannungsnetz ein. Über große 50 Hz-Transformatoren werden sie dann an das Mittelspannungsnetz gekoppelt. Der Einsatz neuartiger Transistoren aus Siliciumkarbid (SiC) mit sehr hohen Sperrspannungen ermöglicht nun auch eine direkte Anbindung der Wechselrichter an das Mittelspannungsnetz. Durch ihre hohe Regeldynamik können SiC-Wechselrichter netzstabilisierende

Aufgaben übernehmen und beispielsweise als aktiver Netzfilter fungieren. Des Weiteren können mit ihrer Hilfe sehr hohe Leistungsdichten erzielt werden.

Im Rahmen des Projekts haben wir einen 250 kW-Wechselrichter-Stack zur Einspeisung in 3 kV-AC-Netze entwickelt. Zum Einsatz kommen dabei neuartige 3,3 kV-SiC-Transistoren. Diese weisen wesentlich geringere Verlustleistungen auf als vergleichbare Siliciumtransistoren und erlauben daher eine Taktung des Wechselrichterstacks mit einer Schaltfrequenz von 16 kHz. Verglichen mit Siliciumtransistoren nach dem aktuellen Stand der Technik entspricht dies einer 10-mal höheren Schaltfrequenz in dieser Spannungsklasse. Die hohe Schaltfrequenz ermöglicht Einsparungen bei den passiven Bauelementen, weil diese kleiner dimensioniert werden können.

Eine weitere Besonderheit des Wechselrichters ist seine aktive Flüssigkeitskühlung, bei der ein synthetischer Ester als Kühlmedium dient. Das Kühlmedium wird durch den Wechselrichter gepumpt und kühlt über einen Flüssigkeitskühlkörper sowohl die Transistoren als auch die Filterdrosseln, die in einem geschlossenen Tank untergebracht sind. Gleichzeitig dient es als elektrisches Isolationsmedium für die Filterdrosseln, wodurch diese kompakter gebaut werden können.

Der Wechselrichter wurde in den Labors des Fraunhofer ISE aufgebaut und getestet, wobei er bei Nennleistung einen sehr hohen Wirkungsgrad von 98,4 % erzielte. Die Konstruktion des Geräts erlaubt das modulare Zusammenschalten von mehreren Wechselrichterstacks, um Systemleistungen von mehreren Megawatt zu erreichen.



*Am Fraunhofer ISE entwickelter 250 kVA-Wechselrichter-Stack mit 3,3 kV-SiC-Transistoren.*

### Kontakt

Andreas Hensel  
Telefon +49 761 4588-5842  
energysystem.components@ise.fraunhofer.de



*Aufbau und Test des SiC-Wechselrichter-Stacks in den Labors des Fraunhofer ISE.*

# Netzdienlicher Gleichrichter für Ladeinfrastruktur und Elektrolyse

Mit dem Ausbau der Ladeinfrastruktur im Mobilitätssektor steigt der Bedarf an unidirektionalen Stromrichtern. Effiziente Gleichrichter sind allerdings nicht nur im Bereich der Elektromobilität unverzichtbar geworden, sondern werden in Zukunft auch für die anvisierte großskalige Wasserstoffherzeugung von Bedeutung sein. Kommerziell verfügbare Gleichrichter mit hoher Leistung, die Wechselspannung in Gleichspannung wandeln, werden heute überwiegend mit Thyristoren aufgebaut. Diese Technologie bringt allerdings den Nachteil mit sich, erhebliche Rückwirkungen auf die Qualität des Stromnetzes zu haben, was zusätzliche Maßnahmen erfordert.

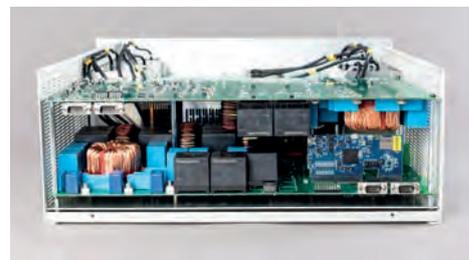
Aus diesem Grund hat das Fraunhofer ISE innerhalb des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekts »HiPolind« einen aktiven Gleichrichter entwickelt. Dabei haben wir, basierend auf der sogenannten »Power Factor Correction«-Topologie (PFC), einen netzgekoppelten Gleichrichter entwickelt. Ziel des Designs ist, die Kosten des Wandlers zu senken und gleichzeitig eine hohe Performance hinsichtlich Effizienz und Stromqualität zu realisieren.

Die 3-Level-PFC-Topologie ermöglicht geringere Verluste in den Leistungshalbleitern und eine Volumenreduktion der dazugehörigen Filterkomponenten. Jede Phase besteht aus zwei Transistoren und vier Dioden, wodurch die Kosten der peripheren Schaltungen im Vergleich zu anderen 3-Level-Topologien reduziert werden. Die Ausgangsgleichspannung arbeitet in einem Bereich von 600 V bis 900 V und die Schaltfrequenz liegt bei 30 kHz. Durch die Implementierung eines neuartigen Reglers werden die Oberschwingungsströme (THDi) im Teillastbereich gegenüber konventionellen Regelungsansätzen um ca. 40 % reduziert. Ebenso sind die aufgebaute Topologie und das dazugehörige Regelungssystem in der Lage, Blindleistung gemäß aktuellen Richtlinien für netzgekoppelte Wandler bereitzustellen.

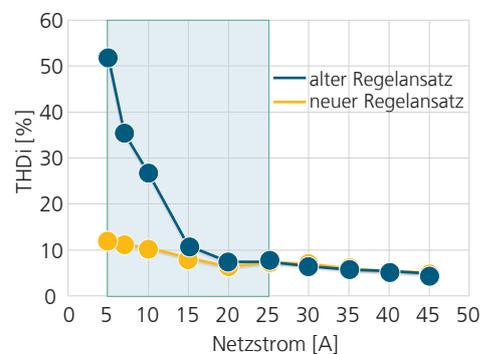
Die luftgekühlte Topologie hat einen maximalen Wirkungsgrad von über 98 % und ist in einem 19 Zoll-Gehäuse aufgebaut, sodass beispielsweise eine einfache Parallelschaltung in Ladesäulen für das sogenannte High Power Charging (HPC) möglich ist. Darüber hinaus kann die PFC perspektivisch in ihrer Leistung skaliert werden und auch im Bereich der Elektrolyse zur Anwendung kommen.



*PFC in  
19 Zoll-Gehäuse.*



*2 x 20 kW-PFC,  
modularer Aufbau.*



*THDi-Verbesserung  
im Teillastbereich.*

## Kontakt

Stephan Liese  
Telefon +49 761 4588-5890  
energysystem.converters@ise.fraunhofer.de

# Veranstaltungen 2022 mit Beteiligung des Fraunhofer ISE

## Januar

Batterieforum Deutschland	online	19.01./25.01.2022
---------------------------	--------	-------------------

## Februar

BatteryWorld 2022	online	16.02. – 17.02.2022
Batterieforum Deutschland	online	02.02./08.02.2022

## März

FC Expo	Tokio, Japan	16.03. – 18.03.2022
LOPEC	München	23.03. – 24.03.2022
Batterietagung	Münster	28.03. – 30.03.2022
SiliconPV	Konstanz/hybrid	28.03. – 01.04.2022

## April

SPIE Photonics Europe	Straßburg, Frankreich	03.04. – 07.04.2022
OWPT Conference	Yokohama, Japan/hybrid	18.04. – 21.04.2022
agra	Leipzig	21.04. – 24.04.2022
CPV-17 – International Conference on Concentrator Photovoltaic Systems	Miyazaki, Japan/ hybrid	25.04. – 27.04.2022
LASER World of PHOTONICS	München	26.04. – 29.04.2022

## Mai

Battery Experts Forum	Frankfurt	03.05. – 05.05.2022
32. Symposium Solarthermie und Innovative Wärme- systeme	Kloster Banz, Bad Staffelstein/ hybrid	03.05. – 05.05.2022
PCIM Europe	Nürnberg	10.05. – 12.05.2022
Intersolar	München	11.05. – 13.05.2022
4. TeraWatt Workshop	Freiburg	16.05. – 17.05.2022
HOPV 2022	Valencia, Spanien/ hybrid	19.05. – 25.05.2022
16 <sup>th</sup> SNEC PV Power Expo	Shanghai, China	23.05. – 26.05.2022
f-cell CANADA	Edmonton, Alberta, Kanada	25.05. – 26.05.2022
International Energy Workshop 2022	Freiburg	25.05. – 27.05.2022
tandemPV Workshop 2022	Freiburg	30.05. – 01.06.2022
Hannover Messe	Hannover	30.05. – 02.06.2022
EMRS Spring Meeting	online	30.05. – 03.06.2022
IFAT	München	30.05. – 03.06.2022

## Juni

49 <sup>th</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference	Philadelphia, Pennsylvania, USA	05.06. – 10.06.2022
AgriVoltaics	Piacenza, Italien/ hybrid	15.06. – 17.06.2022
ICE – International Conference on Electrolysis	Golden, Colorado, USA	20.06. – 23.06.2022
Phenology 2022	Avignon, Frankreich	20.06. – 24.06.2022
E-World energy & water	Essen	21.06. – 23.06.2022
37. PV-Symposium	Freiburg/hybrid	21.06. – 23.06.2022
WHEC	Istanbul, Türkei/ hybrid	26.06. – 30.06.2022

## Juli

43 <sup>rd</sup> IAEE International Conference	Tokio, Japan	31.07. – 04.08.2022
---	--------------	---------------------

## August

ACHEMA	Frankfurt	22.08. – 26.08.2022
--------	-----------	---------------------

## September

PSCO-22	Oxford, Vereinigtes Königreich	05.09. – 07.09.2022
Solar Power International (SPI)	Anaheim, Kalifornien, USA	19.09. – 22.09.2022
Energy Storage/IRES	Düsseldorf	20.09. – 22.09.2022
IAA TRANSPORTION	Hannover	20.09. – 25.09.2022
EU PVSEC	Mailand, Italien	26.09. – 30.09.2022

## Oktober

f-cell	Stuttgart	04.10. – 05.10.2022
Chillventa	Nürnberg	11.10. – 13.10.2022

## November

Mission Hydrogen Conference	online	08.11.2022
PVSEC-33	Nagoya, Japan	13.11. – 17.11.2022
MRS Fall Meeting & Exhibit	Boston, Massachusetts, USA	27.11. – 02.12.2022

Alle Angaben beruhen auf den bis zu Redaktionsschluss vorliegenden Daten. Bitte haben Sie Verständnis dafür, dass es aufgrund der Corona-Pandemie kurzfristig zu Änderungen kommen kann. Unter [www.ise.fraunhofer.de/de/veranstaltungen](http://www.ise.fraunhofer.de/de/veranstaltungen) halten wir Sie stets auf dem Laufenden!

# Impressum

---

## Redaktion

Susanne Mohr  
Christina Lotz (verantwortlich)

## Anschrift der Redaktion

Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Kommunikation  
Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg  
Telefon +49 761 4588-5150  
info@ise.fraunhofer.de  
www.ise.fraunhofer.de

Bestellung von Publikationen bitte per E-Mail.  
Bei Abdruck ist die Einwilligung der Redaktion erforderlich.  
[www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien](http://www.ise.fraunhofer.de/de/presse-und-medien)

© Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Freiburg, 2022

## 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)
-  LinkedIn: [fraunhofer-ise-freiburg](https://www.linkedin.com/company/fraunhofer-ise-freiburg)
-  YouTube: [FraunhoferISE-official](https://www.youtube.com/channel/UCFraunhoferISE-official)

## Konzeption und Gestaltung

netsyn, Freiburg

## Druck

Burger Druck GmbH, Waldkirch

Jahresbericht 2021 / 22  
Fraunhofer-Institut für  
Solare Energiesysteme ISE



# Bildnachweise

---

## Copyrights

Fraunhofer CSP: Seite 13

istock.com/Nirat Muang, Thailand: Seite 17

Adobe Stock/Zhao Dongfang: Seiten 52/53

Crenna, E., Secchi, M., Benini, L., Sala, S.: Global environmental impacts: data sources and methodological choices for calculating normalisation factors. International Journal of LCA, 2018, doi.org/10.1007/s11367-018-1534-9: Seite 63

Fraunhofer-Gesellschaft: Seite 75

sbp sonne gmbh: Seite 77

istock.com/Chunyip Wong: Seite 78

Prof. Jasna Jankovic, University of Connecticut (UConn):  
Seite 80 oben

StoREgio Energiespeichersysteme e.V.: Seite 82 oben

Das Copyright aller anderen Bilder liegt beim Fraunhofer ISE.

## Fotografen

Michael Eckmann: Seiten 47 oben, 86 oben

Tobias Fellmeth: Seite 59

Joscha Feuerstein: Seiten 69 oben, 81

Konrad Fischer: Seite 64

Henning Helmers: Seite 71

Konstantin Ilgen: Seite 68

Guido Kirsch: Titelbild, Seiten 6/7, 12, 50

Manuel Lämmle: Seite 73

Dirk Mahler: Seiten 2, 8 (Henning, Bett, Glunz, Preu, Hebling, Schossig), 22/23, 26, 28, 34, 38, 44/45, 46, 48 oben, 49, 85 oben, 86 unten, 87

Michael Schachtner: Seite 24 oben

Bernd Schumacher: Seiten 8 (Wittwer, Vormfelde), 40

Bernd Steinhäuser: Seite 58

Simon Vieser: Seite 79

Daniel Winter: Seite 76

Kai-Uwe Wudtke: Seiten 8 (Wirth), 18/19, 30, 32, 36

Jutta Zielonka: Seite 57



