

Zahlen und Ergebnisse

---

# Jahresbericht 2022/23



*Das Titelbild zeigt einen 3D-gedruckten Batteriestack auf Basis einer zinkbasierten Batteriezell-technologie mit wässrigen Elektrolyten während der Aushärtung in einer UV-Härtekammer.*

*Batteriespeicher bilden ein Schlüsselement bei der Transformation des Energiesystems. Am Fraunhofer ISE forschen wir an zinkbasierten Batteriezellchemien mit wässrigen Elektrolyten. Sie bieten ein hohes Potenzial hinsichtlich der Kostenreduktion von Aktivmaterialien und Herstellungsprozessen, eine hohe Rohstoffverfügbarkeit durch die Verwendung unkritischer Rohstoffe sowie eine gesteigerte intrinsische Sicherheit und Umweltverträglichkeit aufgrund des wasserbasierten Elektrolyten. Neben der Materialforschung auf Zellebene entwickeln wir am Institut Batteriestack-Konzepte und arbeiten an deren Aufbau und Integration in Speichersysteme.*

Zahlen und Ergebnisse



Jahresbericht 2022/23



## Vorwort

---

In den vergangenen drei Jahren haben wir erlebt, dass wissenschaftliche Fragen die Menschen jeden Tag begleiten und starken Einfluss auf ihr alltägliches Leben nehmen. Mit dem Beginn des Kriegs von Russland gegen die Ukraine im Frühjahr 2022 hat sich der Fokus von wissenschaftlich-medizinischen Fragestellungen zunehmend auf Fragen der Energieversorgung- und -sicherheit verlagert. Wir stehen vor der großen Herausforderung, Abhängigkeiten von fossilen Energieträgern aufzulösen und möglichst rasch die richtigen Weichen für eine neue, erneuerbare Energieversorgung zu stellen.

Am Fraunhofer ISE arbeiten wir seit jeher an der Vision eines Energiesystems, das ohne fossile Energieträger auskommt. Wir verfügen über das nötige Know-how, um einen wichtigen Beitrag für eine »beschleunigte Energiewende« zu leisten und in die Wirtschaft zu transferieren. Auch die Akzeptanz der Energiewende in der Gesellschaft ist dabei ein Thema, zu dem wir in engem interdisziplinärem Austausch mit Vertreterinnen und Vertretern aus Politik, Wirtschaft und Wissenschaft stehen, wie unser Symposium [»Ist die Energiewende nachhaltig umsetzbar?«](#) gezeigt hat.



Dass die Energiewende inzwischen in der breiten Öffentlichkeit angekommen ist, zeigt nicht nur die bei uns um das Doppelte gestiegene Anzahl an Medienanfragen; auch die Anfragen aus der Politik und der Industrie in Bezug auf Lösungskonzepte zum Ausstieg aus fossilen Energieträgern und einer höheren Eigenversorgung unter Nutzung erneuerbarer Energien haben sich deutlich erhöht. So erfahren [Wärmepumpen](#) eine sehr hohe Aufmerksamkeit und unsere Abhängigkeit von China im Hinblick auf die PV-Wertschöpfungskette führt nun zu intensiven Diskussionen über eine Wiederansiedelung der [PV-Industrie in Europa](#). Auch das Thema Flächen für die Photovoltaik, das wir mit unserem [Leitthema »Integrierte Photovoltaik«](#) adressieren, ist sehr gefragt. Wir bedanken uns an dieser Stelle herzlich für das große Engagement unserer Mitarbeitenden, die sich all diesen ebenso vielfältigen wie zahlreichen Aufgaben mit großem Einsatz widmen.

Die aktuelle Situation erfordert aber nicht nur größere Anstrengungen in Hinblick auf unsere Forschungsaktivitäten, sondern auch eine kritische Analyse des eigenen Energieverbrauchs. Auch die Fraunhofer-Gesellschaft und das Fraunhofer ISE müssen ihren Beitrag zur Erreichung der Energiesparziele der EU und der Bundesnetzagentur leisten. Als eines der größten Fraunhofer-Technologie-Institute ist der Energiebedarf des Instituts naturgemäß überdurchschnittlich hoch. Dass wir gute Fortschritte bei den Energieeinsparungen machen konnten – besonders im Bereich der Wärme – verdanken wir dem umsichtigen und verantwortungsvollen Handeln unserer Mitarbeitenden in allen Bereichen des Instituts.

Konsequent haben wir im vergangenen Jahr unsere [Institutsstrategie](#) weiterentwickelt, in der wir unsere [Mission und unsere Leitsätze](#) konkretisieren und mit kurz-, mittel-, und langfristigen Maßnahmen hinterlegen. Sie berücksichtigt den Aspekt einer »umfassenden Nachhaltigkeit« besonders in Hinblick auf Effizienz, geschlossene Ressourcenkreisläufe sowie Verlängerung der Gebrauchsdauer von Materialien und Komponenten, aber auch die Anforderungen seitens Kunden, wissenschaftlicher Exzellenz, Qualitätsmanagement, Prozessoptimierung, Vernetzung und Zusammenarbeit.

Im Bereich der Energiesysteme erfordert der steigende Anteil volatil erzeugten Stroms neue Lösungsansätze, um eine stabile und ausfallsichere Energieversorgung zu garantieren. Eine wichtige strategische Säule in unseren Forschungstätigkeiten sind daher [stationäre Energiespeicher](#), die wir mit unserem

Leitthema [»Stationäre Batteriespeicher – Stabilität und Flexibilität im Energiesystem«](#) adressieren. Besonders freuen wir uns in diesem Zusammenhang, dass es uns gelungen ist, auch in diesem Jahr unsere Forschungsinfrastruktur weiter auszubauen. Nach einer mehrjährigen Planungs- und Bauphase konnten wir Anfang 2022 die ersten Labors unseres neuen [»Zentrums für elektrische Energiespeicher«](#) im Freiburger Süden in Betrieb nehmen. In dem neuen Gebäude werden wir zukünftig entlang der gesamten Wertschöpfungskette an innovativen Batteriematerialien und -zellen forschen. Ein wichtiger Fokus unserer Arbeiten liegt dabei auf der Erschließung von – noch immer – großen Optimierungspotenzialen im Bereich der Lithium-Ionen-Technologie, aber auch auf der Erforschung alternativer Technologien wie beispielsweise der von uns weiterentwickelten Zink-Ionen-Batterie.

Unsere wissenschaftliche Exzellenz haben wir 2022 zudem wieder in vielen Projekten und Initiativen unter Beweis gestellt. Ein besonderes Highlight stellt hierbei die Nominierung der »ChargeBox«, ein speicherbasiertes Ultra-Schnellladesystem für Elektromobilität, für den Deutschen Zukunftspreis des Bundespräsidenten dar. Im Bereich der Wärmepumpen-Technologie konnten wir einen wichtigen Durchbruch erzielen: Gemeinsam mit einem Konsortium aus Wärmepumpenherstellern hat das Fraunhofer ISE einen standardisierten Kältekreis entwickelt, der mit nur 124 Gramm Propan eine Heizleistung von 12,8 Kilowatt erreicht – ein Ergebnis, über das wir uns ebenso sehr freuen wie über die Entwicklung der weltweit effizientesten Solarzelle der Welt mit 47,6 % Wirkungsgrad.

Unseren Kuratoriumsmitgliedern, Auditorinnen und Auditoren, Stipendiengebern, Ansprechpartnerinnen und Ansprechpartnern sowie Fördermittelgebern 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 die dringend benötigte Transformation hin zu einem nachhaltigen und 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 .....    | 54 |
| Veranstaltungen 2023 .....            | 90 |
| Impressum .....                       | 91 |
| Bildnachweise .....                   | 92 |

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 |
| Promotionen .....                                                      | 15 |
| Das Fraunhofer Center für Silizium-Photovoltaik (CSP) in Halle .....   | 16 |
| Das Centro para Tecnologías en Energía Solar (FCR-CSET) in Chile ..... | 17 |
| Preise und Auszeichnungen .....                                        | 18 |

# Organisationsstruktur



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

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
- 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

# 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

### Ullrich Bruchmann

Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Berlin

### Dr. Gunter Erfurt

Meyer Burger AG

### Jürgen Heizmann

AZUR SPACE Solar Power GmbH, Heilbronn

### Ministerialdirigentin Sibylle Hepting-Hug

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

### 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

Profas Energy Consult, Grünwald

### 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

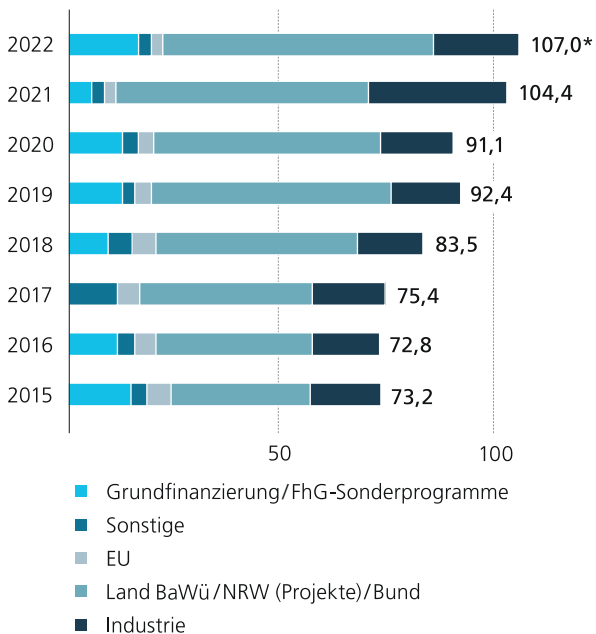
(Stand: 31.12.2022)

*Mitglieder des Kuratoriums sowie externe Teilnehmer und Teilnehmerinnen der Kuratoriumssitzung im Juli 2022. V.l.n.r.: Thomas Speidel, Dr. Norbert Schiedeck, Dr. Ingrid Vogler, Dr. Klaus Bonhoff, Prof. Dr. Anke Weidlich, Ullrich Bruchmann, Dr. Gunter Erfurt, Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer, Jürgen Heizmann, Daniel Etschmann, Prof. Dr. Wolfram Münch, Peter Schneidewind, Dr. Stefan Reber, Prof. Dr. Anke Weidlich, Ministerialdirigentin Sibylle Hepting-Hug.*

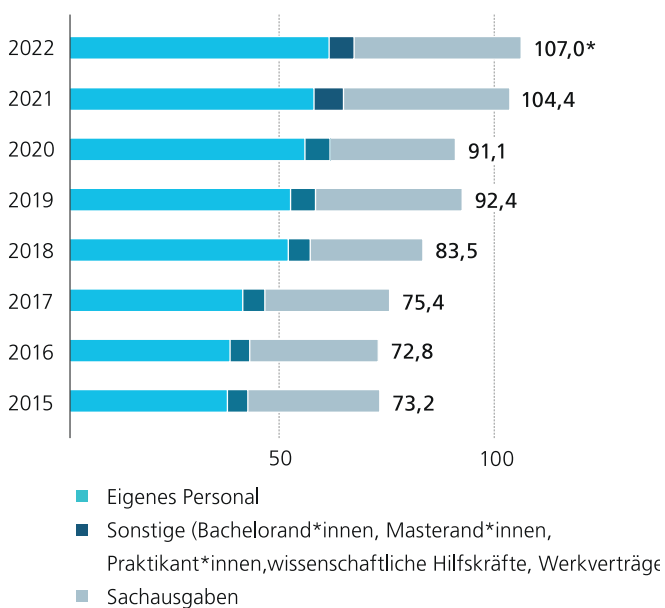


# Das Institut in Zahlen

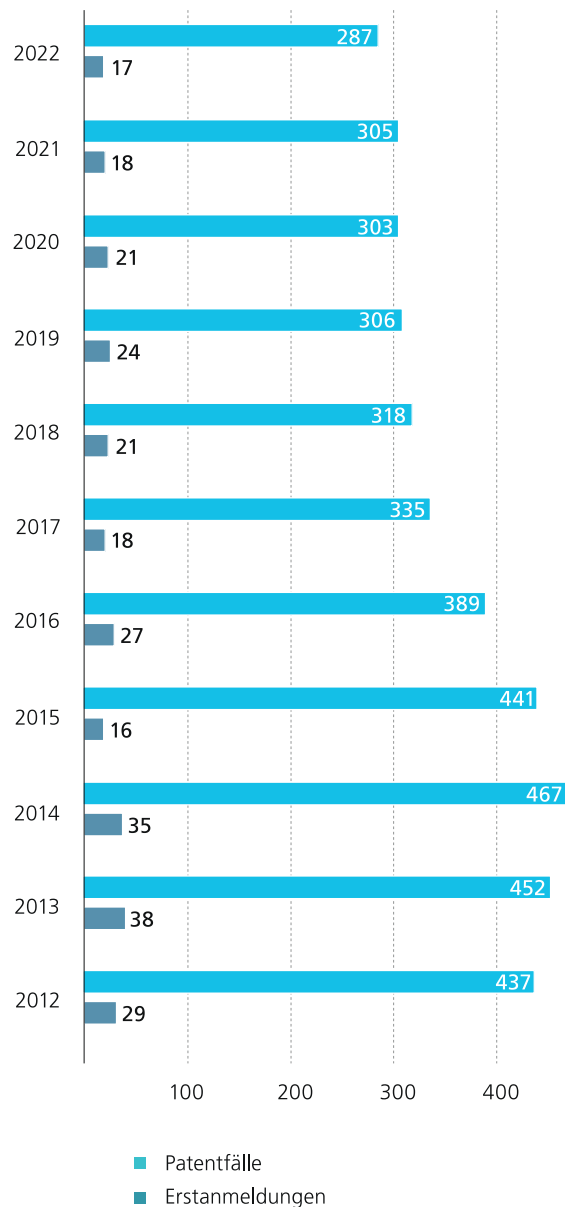
## Entwicklung der Erträge in Mio €\*\*



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

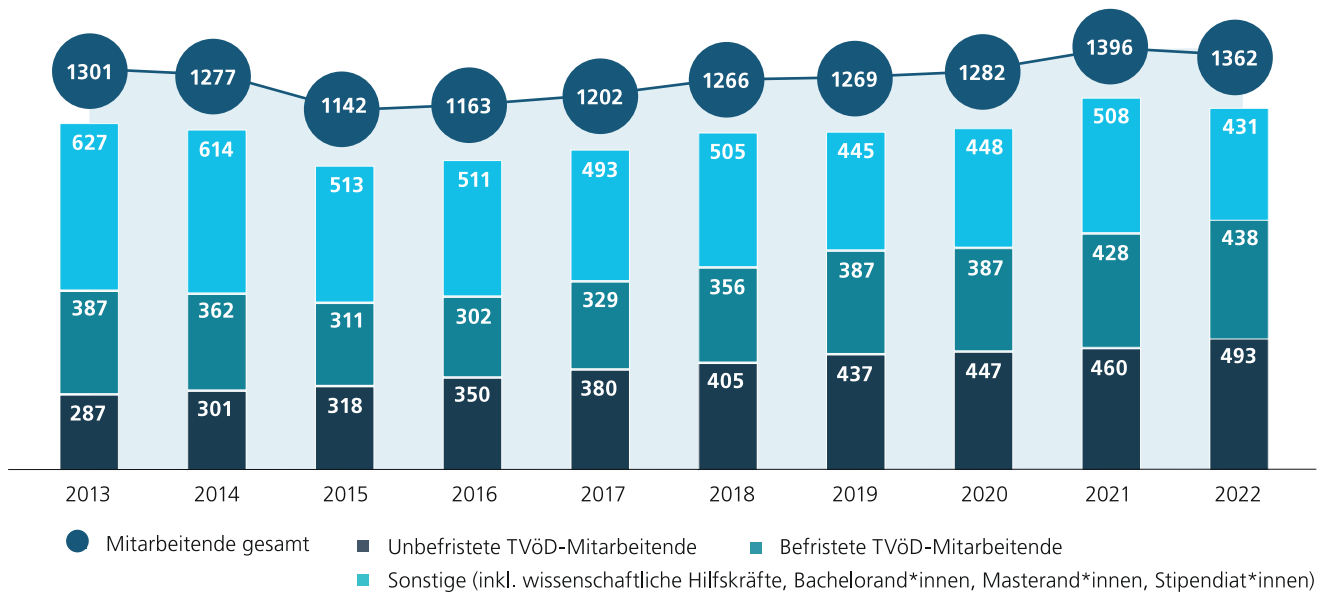


## Patente

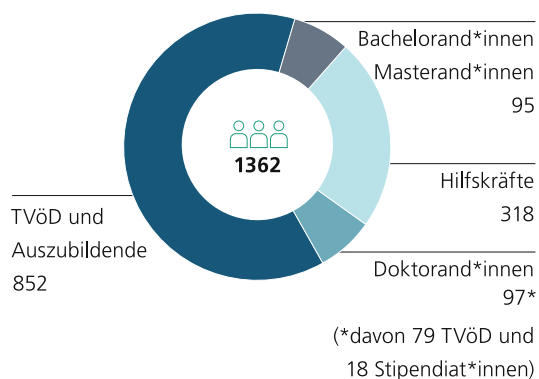


\* Vorläufig \*\* Ohne Investitionen – der Gesamthaushalt 2022 (inkl. Investitionen) betrug 119,3 Mio €.

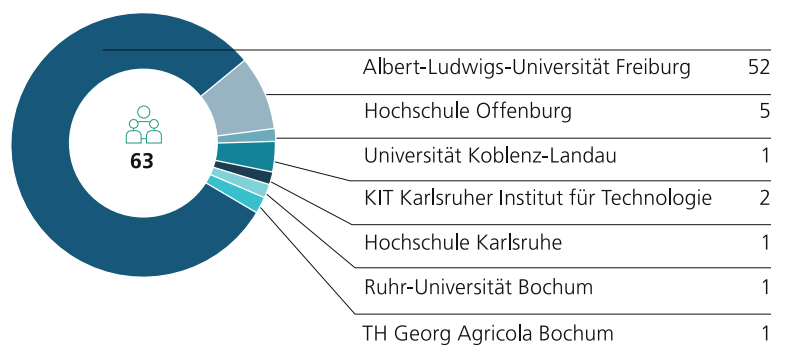
## Entwicklung der Mitarbeitendenzahlen



## Personalstruktur



## Lehrveranstaltungen



46 Wissenschaftler\*innen des Fraunhofer ISE sind neben ihrer Forschungstätigkeit auch in der Lehre tätig.

# Profil

## Zielsetzung

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg ist das größte Solarforschungsinstitut Europas. Unsere rund 1 400 Mitarbeitenden arbeiten für ein nachhaltiges, wirtschaftliches, sicheres und sozial gerechtes Energieversorgungssystem auf Basis erneuerbarer Energien. Dazu tragen wir mit unseren Forschungsschwerpunkten in den Bereichen Energiebereitstellung, Energieverteilung, Energiespeicherung und Energienutzung bei. Durch herausragende Forschungsergebnisse, erfolgreiche Industrieprojekte, Firmenausgründungen und globale Kooperationen gestalten wir die nachhaltige Transformation des Energiesystems. Neben einer Grundfinanzierung über die Fraunhofer-Gesellschaft finanziert sich das Fraunhofer ISE zu rund 85 % durch Aufträge in den Bereichen angewandte Forschung, Entwicklung und Hochtechnologie-Dienstleistungen. 2022 betrug der Gesamtetat des Instituts (inklusive Investitionen) 119,3 Millionen Euro.

## 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 28 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 48/49](#)). 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

*Ostansicht des Fraunhofer  
ISE-Hauptgebäudes.*

*Magistrale im  
Fraunhofer ISE-  
Hauptgebäude.*



# Kooperationen

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

## Kooperationen mit Hochschulen

Ein starker Fokus des Fraunhofer ISE liegt auf der Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Derzeit sind 46 Mitarbeitende in der Lehre tätig; das Institut zählt ca. 200 Bachelor-, Master-, und Promotionsstudierende und engagiert sich in zahlreichen Kooperationen mit Universitäten und Hochschulen in Deutschland und weltweit.

Besonders intensiv ist die Zusammenarbeit mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Eine enge Kooperation besteht mit dem [Institut für Nachhaltige Technische Systeme \(INATECH\)](#) der Technischen Fakultät, dessen Schwerpunkte nachhaltige Materialien, Energiesysteme und Resilienz sind. 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 Vernetzung mit Unternehmen, Verbänden und weiteren Akteuren aus der Region im Themenfeld Nachhaltigkeit fördert.

*Das Fraunhofer ISE kooperiert eng mit der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg.*



Auch bei vielen anderen zentralen Institutionen und Aktivitäten der Universität Freiburg bringt sich das Fraunhofer ISE ein. So tragen wir mit unserer Expertise im Bereich der Photovoltaik zum laufenden Exzellenzcluster livMatS bei. 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 Freiburg 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«.

## Memoranda of Understanding

Zudem hat das Fraunhofer ISE weltweit Memoranda 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

Durch die Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft kann eine große Bandbreite von Kompetenzen eingebracht werden. Dies stärkt besonders die Bearbeitung systemischer Fragestellungen.

## Verbünde und strategische Forschungsfelder

Die Fraunhofer-Institute arbeiten in kompetenzorientierten Verbünden zusammen. Das Fraunhofer ISE ist gemeinsam mit drei weiteren Instituten Mitglied im [Fraunhofer-Verbund Energietechnologien und Klimaschutz](#), der im Januar 2021 gegründet wurde. Prof. Dr. Hans-Martin Henning hat die Rolle des Vorsitzenden 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 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 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 [»Batterien«](#) 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 Geschäftsbereichen Energie Erneuerbar, Energie Speicher, Energie Effizient, Energie Digital, Energie System, Energie Urban, Energie Netze sowie Energie I Klima I Umwelt.

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

*Das Fraunhofer ISE ist Sitz der Geschäftsstelle der Fraunhofer-Allianz Energie, die Kompetenzen im Bereich der Energieforschung bündelt.*



# Promotionen

---

**Dmitry Bogachuk**

»Understanding and Improving Perovskite Photovoltaic Devices with Carbon-Based Back-Electrodes«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022

**Mathias Drews**

»Anode Materials and Processing Technologies for Modern Lithium-Ion Cell Concepts«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022

**Benjamin Grübel**

»Development of Plating Process Sequences for High Efficiency Bifacial c-Si Solar Cells«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022

**Jan Herterich**

»Advanced Characterization of Ionic Motion Effects in Perovskite Solar Cells«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022

**Christoph Meßmer**

»Numerical Simulation and Analysis of High-Efficiency Silicon Solar Cells and Tandem Devices«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022

**Matthias Mühleis**

»Spectral Shaping for Accurate Solar Cell Characterization«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022

**Florian Nestler**

»Dynamic Operation of Power-to-X-Processes Demonstrated by Methanol Synthesis«

Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2022

**Jana-Isabelle Polzin**

»Poly-Si Based Passivating Contacts for High-Efficiency Silicon Solar Cells«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022

**Regina Post**

»Assessment and Application of Defect Characterization via Lifetime Spectroscopy in High Purity c-Si«

Universität Konstanz, 2022

**Li Carlos Rendler**

»Manufacturing and Analysis of Wave-Shaped Wires for Stress-Reduced Interconnection of Silicon Solar Cells«

Universität des Saarlandes, 2022

**Theresa Trötschler**

»A Computational Toolbox to Assess VGF-Grown Silicon: Identification and Interpretation of Characteristics for Grain and Defect Development«

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2022

# Das Fraunhofer Center für Silizium-Photovoltaik (CSP) in Halle

Das Fraunhofer CSP in Halle ist eine gemeinsame Einrichtung des Fraunhofer ISE und des Fraunhofer-Instituts für Mikrostruktur von Werkstoffen und Systemen IMWS. Es beschäftigt knapp 100 Mitarbeitende. Die Wahl des Standorts hängt eng mit der Nähe zum deutschen Solar Valley in Thalheim zusammen. Unser Schwerpunkt liegt auf der Materialforschung und Materialentwicklung. Dabei decken wir unter anderem den Bereich der Siliziumkristallisation und Waferfertigung sowie das schnell wachsende Feld des Recyclings von Photovoltaik-altmodulen ab.

Für eine Wiederansiedlung der Photovoltaikproduktion in Europa kommt der Herstellung von Silizium-Einkristallen und der anschließenden Waferfertigung eine zentrale Bedeutung zu. Hier arbeitet das CSP an der Entwicklung einer Ingot-technologie mit 300 mm und der Fertigung von Wafern mit 210x210 mm<sup>2</sup> im Format G12 – beides Themenfelder, in denen Europa Know-how verloren hat und sich neue Expertise aufbauen muss. In verschiedenen Verbundprojekten (z. B. »G12«, »WaGner«, »EPINEX«) suchen wir gemeinsam mit den wichtigsten deutschen Firmen zukunftsweisende Lösungen. Die europaweit ersten Wafer im Format 210x210 mm<sup>2</sup> konnten am CSP gefertigt werden. Unsere Kristallisationsanlagen und unsere Vieldrahtsägen in Industriegröße erlauben FuE-Aktivitäten auf Produktionsniveau.

Der Abbau und das Recycling von ausgemusterten Altmodulen und defekten Modulen ist ein rasant wachsender Geschäftsbereich. In den kommenden Jahren werden viele PV-Anlagen aus der Förderung fallen und abgebaut werden – von derzeit

ungefähr 10 000 Jahrestonnen werden die Rücklaufströme bald die Hunderttausend-Tonnen-Marke überschreiten. Die deutschen Recyclingunternehmen stehen vor der Herausforderung, einen wirtschaftlich tragfähigen Recyclingprozess zu entwickeln, der große Durchsätze mit hochwertiger Stofftrennung und Materialreinheit realisieren kann. Wir arbeiten daher intensiv an der Rückgewinnung von Silicium aus Altmodulen, der Extraktion von Silber und Kupfer sowie der Rückführung von Solarglas in die Glasschmelze. Unsere enge Kooperation mit führenden nationalen Recyclingunternehmen und Solarglasproduzenten ermöglicht hier eine marktnahe Forschung mit industrierelevanten Stoffströmen. Die Herstellung von Czochralski-Monoingoten, von Wafern und von PERC-Zellen aus 100 % Recyclingsilicium stellte im vergangenen Jahr einen wichtigen Schritt in Richtung eines geschlossenen Kreislaufes und einer Verbesserung der Nachhaltigkeit dar.

Mit einer Technikumsfläche von 1 200 m<sup>2</sup> und einer Kranhöhe von > 6 m (bzw. > 11 m im Bereich der Kristallisationsanlagen) ist das CSP exzellent für die Installation und den Betrieb von Pilotanlagen für die Materialentwicklung ausgelegt. Unser Kristallisationsprozess im Dreischichtbetrieb erlaubt realistische, industrierelevante Versuchsbedingungen.

2022 ist das CSP zum vierten Mal in Folge in der Bestenliste »Deutschlands innovativste Unternehmen« ausgezeichnet worden. Das Ranking wird vom Wirtschaftsmagazin »Capital« in Zusammenarbeit mit dem Marktforschungsdienstleister »Statista« erstellt und beruht auf Befragungen unter Branchen- und Innovationsfachleuten.

*Die Fassade des Fraunhofer CSP in Halle von der Südseite.*



*Czochralski-Anlagen für die Monoingotherstellung (links) und Silizium-Einkristalle (rechts).*



# Das Centro para Tecnologías en Energía Solar (FCR-CSET) in Chile

International arbeitet das Fraunhofer ISE mit dem Centro para Tecnologías en Energía Solar (FCR-CSET) der Fraunhofer Chile Research Foundation mit Sitz in Santiago zusammen. Dieses ist Teil der 15 unabhängigen internationalen Verbundzentren der Fraunhofer-Gesellschaft und bearbeitet die Forschungsschwerpunkte solare Stromerzeugung, Solarthermie sowie Aufbereitung von Wasser und Prozesswärme. Zusätzlich sind Anwendungen zur Wasserstoffproduktion und die Umwandlung in dessen Derivate ein aktuelles Thema.

Das FCR-CSET nimmt mit seiner wegweisenden Forschungs- und Entwicklungsarbeit im Bereich der Solarenergiesysteme und -technologien eine führende Rolle in Lateinamerika ein. Zugleich kann es auf die breiten Kompetenzen der Fraunhofer-Institute in Deutschland zurückgreifen. Der Technologietransfer und die Anpassung an die spezifischen Bedingungen in Chile sowie die Optimierung von Anlagendesign und -betrieb sind dabei zentrale Elemente. Die Gründung des FCR-CSET im Jahr 2014 geht auf das Programm zur Förderung der chilenischen Wirtschaft CORFO zurück, das sich zum Ziel gesetzt hatte, die Ansiedlung internationaler Exzellenzzentren zu fördern. Das FCR-CSET arbeitet nach dem Fraunhofer-Prinzip der angewandten Forschung und transferiert seine Forschungsergebnisse in die chilenische Industrie, um dort das Wachstum der Solarbranche voranzutreiben.

Chile ist ein Land, das sich über viele Breitengrade erstreckt und somit diverse Klimazonen aufweist: Im kargen Norden, wo sich die Minenindustrie befindet, herrscht die stärkste Sonneneinstrahlung der Welt. Hier ist einer der besten Standorte, um die Solarenergie zur Dekarbonisierung und Stromerzeugung zu nutzen. Selbst in der Region um Santiago ist die Sonneneinstrahlung immer noch höher als in den besten Lagen

von Südeuropa. Im Süden von Chile herrschen ähnliche solare Strahlungsbedingungen wie in Deutschland. Der Markt ist bisher wenig erschlossen und das Potenzial für regenerative Energien ist – im Verhältnis zum Eigenbedarf – riesig.

Das FCR-CSET leistet einen bedeutenden Beitrag zur chilenischen Solarforschung. Mit einer jährlichen Förderung von 580 000 Euro, hochgerechneten Erträgen von 135 000 Euro aus öffentlichen und 310 000 Euro aus privaten Projekten hat das Fraunhofer CSET im Mittel der vergangenen Jahre zwischen 25 und 30 Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen sowie Graduierte beschäftigt und ausgebildet. Momentan sind 25 Mitarbeitende beschäftigt, davon 85 % Ortskräfte und 15 % internationale Mitarbeitende.

Aktuell stehen Demonstrationsvorhaben für industrielle Anwendungen auf Basis von Solarenergie zur Dekarbonisierung und Wasserstoffproduktion im Vordergrund. Es wurden bereits drei Pilotanlagen für Agri-Photovoltaik in der Nähe von Santiago errichtet, um den Wettbewerb bei der Landnutzung in Ballungsgebieten zu mindern. Im Jahr 2022 hat das FCR-CSET eine Floating-PV-Anlage installiert, um die Vorteile insbesondere durch eine reduzierte Wasserverdunstung darzustellen. Weitere Demonstrationsvorhaben mit Technologietransfer von Fraunhofer-Instituten aus Deutschland sind in der Bearbeitung. Das Fraunhofer ISE ist das Partnerinstitut des chilenischen Fraunhofer CSET und arbeitet auf allen Ebenen eng mit seiner chilenischen Schwester zusammen.

*Von links nach rechts: Jucosol-Projekt zur Einbindung der Solarthermie in die Getränkeindustrie; Floating-PV-Anlage in Paine; solarmetrische Messstation in der Atacama-Wüste.*



# Preise und Auszeichnungen

---

## **Salma Zouhair**

2. Platz Nanoge Spring Meeting 2022, Präsentation  
»Low Dimensional 2D Perovskite as an Effective Electron  
Blocking Layer in Efficient (18,5 %) and Stable Hole-Selective  
Layer-Free Carbon Electrode Based Perovskite Solar Cells«,  
Fundació Scito, 07. – 11.03.2022

## **Fraunhofer Institut für Solare Energiesysteme ISE**

World Clean Tech Award, »Visionary CleanTech R&D  
Institution«, CleanTech Business Institute, 15.03.2022

## **Dr. Johannes Greulich**

SiliconPV Award, Paper »Contactless Measurement of Current-  
Voltage Characteristics for Silicon Solar Cells«, SiliconPV 2022,  
28.03. – 01.04.2022

## **Katharina Gensowski**

SiliconPV Award, Paper »Filament Stretching During  
Parallel Dispensing – a Way to Reduce Ag Consumption  
in SHJ Metallization«, SiliconPV 2022, 28.03. – 01.04.2022

## **Thibaud Hatt**

SiliconPV Award, Paper »Plated Copper Electrodes for  
Two-Terminal Perovskite Silicon Tandem Solar Cells«,  
SiliconPV 2022, 28.03. – 01.04.2022

## **Dr. Daniel Ourinson**

SiliconPV Award, Best Poster Award, »Faster Firing  
Processes up to 20 m/min Belt Velocity«, SiliconPV 2022,  
28.03. – 01.04.2022

## **Jana-Isabelle Polzin**

SiliconPV Award, Best Poster Award, »Annealing and Firing  
Stability of in situ Boron-doped poly-Si Passivating Contacts«,  
SiliconPV 2022, 28.03. – 01.04.2022

## **Dr. Markus Feifel**

Hugo-Geiger-Preis 2021, Dissertation »Hocheffiziente  
III-V-Mehrfachsolarzellen auf Silicium«, Freistaat Bayern,  
Fraunhofer-Gesellschaft, 29.03.2022

## **Dr. Henning Helmers, Dr. Oliver Höhn, Meike Schauerte**

Best Paper Award, »Subcell Spectral Response Determination  
for Multi-Junction Photonic Power Converters based on  
Negative Bias-I-V Measueremen«, OWPT Conference,  
21.04.2022

## **Elisa Kaiser**

Young Scientist Award, Präsentation »Effects of Manufacturing  
Tolerances on Micro-CPV Module Performance«,  
CPV-18 Conference, 25.04.2022

## **Franz Mantei, Dr. Ouda Salem**

3. Platz beim Ideenwettbewerb »Fraunhofer 2030 klima-  
neutral«, Projekt »Zero-Emission-Vehicle Concept Using FhISE  
n-COMET & CatVap® Technologies«, Fraunhofer-Gesellschaft,  
29.04.2022

## **Özde Seyma Kabakli**

Best Poster Presentation Award, »Optimization of Serial  
Co-Sputtered Indium-Zinc Oxide (IZO) Films for Perov-  
skite Silicon Tandem Solar Cells«, 15<sup>th</sup> HOBV Conference,  
19. – 25.05.2022

## **Arne Surmann**

Best Poster Award, »Energiegemeinschaften in Österreich –  
lohnend auch für Deutschland? Eine Fallstudie im Projekt  
EnStadt:Pfaff«, PV-Symposium, 23.06.2022

## **Johanna Kucknat**

Masterand\*innen-Preis des Vereins zu Förderung der solaren  
Energiesysteme e.V., Masterarbeit »The Role of the Euro-  
pean Green Deal for the Decarbonization of the Chemical  
Sector«, Verein zur Förderung der solaren Energiesysteme e.V.,  
12.07.2022

## **Dr. Juan Francisco Martinez Sanchez**

1. Platz beim Gips-Schüle-Nachwuchspreis 2022, Doktorarbeit  
»Development of Hybrid Concentrator/Flat-Plate Photovoltaic  
Technology to Reach the Highest Energy Yield«,  
Gips-Schüle-Stiftung, 18.07.2022

*Moderatorin Mai Thi Nguyen-Kim, Stefan Reichert (Fraunhofer ISE), Dr. Thorsten Ochs, Thomas Speidel (beide ADS-TEC Energy) und Bundespräsident Frank-Walter Steinmeier im Rahmen der Veranstaltung zur Verleihung des Deutschen Zukunftspreises 2022.*



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

2. Platz bei Science4Life Energy Cup in der Businessplanphase, Businessplan »PV2plus«, Science 4Life e.V., 18.07.2022

**Stefan Reichert et al.**

Nominierung für den Deutschen Zukunftspreis 2022, Preis des Bundespräsidenten für Technik und Innovation, Projekt »Elektroautos in wenigen Minuten aufladen – auch am leistungsbegrenzten Stromnetz (»ChargeBox«)«, Geschäftsstelle Deutscher Zukunftspreis, Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft, 06.09.2022

**Natapon Wanapinit**

Best Paper Award, »Electricity Trading in Local Sector-Coupled Energy Communities«, 18. International Conference on the European Energy Market, 15.09.2022

**Patrick Jürgens**

Best Student Paper Award, »Modelling Germany's Energy Transition Within a 1.5 °C-CO<sub>2</sub>-Budget«, IAEE European Energy Conference, 24.09.2022

**Clara Rittmann et al.**

WCPEC Student Award, Paper »Epitaxially Grown p-type Silicon Wafers Ready for Cell Efficiencies Exceeding 25 %«, WCPEC-8 2022, 26.–30.09.2022

**Philipp Kunze et al.**

WCPEC Student Award, Paper »Contactless Inline IV-Measurement of Solar Cells Using an Empirical Model«, WCPEC-8 2022, 26.–30.09.2022

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

Make It Matter Award, »PV2plus«, EWS Schönau und Smart Green Accelerator, 27.09.2022

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

1. Platz beim Pfiffikus-Preis für Gründerideen, Geschäftsidee »PV2plus«, Bildungstiftung Rhenania Freiburg e.V., 13.10.2022

**Ai-Lin Chan**

Robert-Mayr-Nachwuchsförderpreis, Masterarbeit »Analysis of the Influence of Conditioning Procedures on PEM Electrolysis Cells via Impedance Spectroscopy«, Eva Mayr-Stihl Stiftung, 19.10.2022

**Pedro Viera Rodrigues**

Robert-Mayr-Nachwuchsförderpreis, Masterarbeit »The Doping Dependence of BH-Pair Formation and High and Elevated Temperature-Induced Degradation«, Eva Mayr-Stihl Stiftung, 19.10.2022

**Dr. Lukas Wagner**

Eva-Mayr-Stihl-Nachwuchspreis, Doktorarbeit »Perovskite Photovoltaic Modules With a Very Low CO<sub>2</sub> Footprint: The in situ Technology«, Eva Mayr-Stihl Stiftung, 19.10.2022

**Clemens Dankwerth, Dr. Lena Schnabel**

2. Platz beim Deutschen Rohstoffeffizienz-Preis, Projekt »LC150 – Entwicklung eines kältemittelreduzierten Wärmepumpenmoduls mit Propan«, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), 19.10.2022

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

3. Platz beim CyberOne Hightech Award, Businessplan »PV2plus«, bwcon GmbH, 10.11.2022

**Chinmay Rayeey Bapat**

Masterand\*innen-Preis des Vereins zur Förderung der solaren Energiesysteme e.V., Masterarbeit »Development of Silicon Polymer Composites for Lithium Ion Batteries«, Verein zur Förderung der solaren Energiesysteme e.V., 15.12.2022

# Strategie und Geschäftsbereiche

---





Regelmäßige Infos zu  
Meilensteinen unserer  
Forschung bieten  
unsere Newsletter!

# Inhalt

|                                                            |           |
|------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Technologiesouveränität und Nachhaltigkeit im Fokus</b> | <b>22</b> |
| <b>Stationäre Batteriespeicher</b>                         | <b>24</b> |
| <b>»Ist die Energiewende nachhaltig umsetzbar?«</b>        | <b>26</b> |
| <b>Geschäftsfelder</b>                                     | <b>28</b> |
| Silicium-Photovoltaik                                      | 28        |
| III-V- und Konzentrator-Photovoltaik                       | 30        |
| Perowskit- und Organische Photovoltaik                     | 32        |
| Photovoltaische Module und Kraftwerke                      | 34        |
| Energieeffiziente Gebäude                                  | 36        |
| Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse           | 38        |
| Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme        | 40        |
| Wasserstofftechnologien                                    | 42        |
| Elektrische Energiespeicher                                | 44        |
| <b>Das neue Zentrum für elektrische Energiespeicher</b>    | <b>46</b> |
| <b>FuE-Infrastruktur</b>                                   | <b>48</b> |
| <b>Akkreditierte Labors</b>                                | <b>50</b> |

# Technologiesouveränität und Nachhaltigkeit im Fokus

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

### Wie hat sich die omnipräsente Energiekrise in den vergangenen Monaten auf die Arbeit des Fraunhofer ISE ausgewirkt?

*Henning:* »Es wurde noch deutlicher, dass die Transformation des Energiesystems nicht nur wichtig ist, um unsere Klimaziele zu erreichen, sondern auch, um unsere Energieversorgung unabhängiger und resilienter machen. Zudem ist die Marktnachfrage nach fast allen Technologien, an denen wir am Institut arbeiten, so massiv gestiegen, dass der Markt sie kaum noch befriedigen kann.«

*Bett:* »Unsere Forschung und Entwicklung orientiert sich grundsätzlich an den langfristigen Klimaschutzzielen. Richtig ist, dass bei unseren Kunden eine ungeheure Nachfrage nach Produkten entstanden ist, die diese nun befriedigen wollen und müssen. Das spüren wir wiederum durch deutlich mehr Anfragen. Auch in der Politik haben sich merklich Änderungen ergeben. Ein Beispiel ist der Ruf nach Energiesouveränität und mehr technologischer Souveränität. Das propagiert die Fraunhofer-Gesellschaft schon seit einigen Jahren. Daher arbeiten wir an Konzepten mit, um die Photovoltaik-Produktion wieder nach Deutschland und Europa zu bringen.«

### Wie kann mehr Eigenständigkeit in der europäischen PV-Produktion erreicht werden?

*Bett:* »Wir müssen uns die gesamte Wertschöpfungskette ansehen. 97 % der Wafer weltweit kommen aus China. Das sollte sich ändern. Wir sind dafür in Deutschland gut positioniert, denn es gibt eine Innovations-Pipeline aus guten Forschungsergebnissen entlang des ganzen Produktionsprozesses. Für potenzielle Investoren bleibt aber die Frage: Was passiert, wenn z. B. chinesische Produzenten wieder mit Dumpingpreisen den Markt überschwemmen? Das ist eine Frage, die politisch mit den richtigen Rahmenbedingungen gelöst werden muss. In jedem Fall besteht wieder deutliches Interesse, in Europa zu produzieren. Um den Prozess zu unterstützen, haben wir 2022 erstmals einen Investoren-Workshop »Technology meets Finance« durchgeführt. Das war sehr erfolgreich und wir werden das in Zukunft weiterführen.«

*Henning:* »Forschung und Entwicklung in den höheren technologischen Reifegraden, wie wir sie z. B. am PV-TEC sehr erfolgreich praktizieren, kann zudem beitragen, die Eintrittshürden für Investoren zu senken. Da ist das Fraunhofer-Modell der angewandten Forschung, das sehr eng mit den Herstellern zusammenarbeitet, sehr gut geeignet.«

### Wärmepumpen als Schlüsseltechnologie für die Wärmewende sind derzeit ein großes Thema. Welchen Beitrag kann das Fraunhofer ISE leisten?

*Henning:* »Es macht sich bezahlt, dass wir schon seit Jahrzehnten an diesem Thema arbeiten und früh die Einschätzung vertreten haben, dass Wärmepumpen die wohl wichtigste Technologie für die zukünftige Wärmeversorgung werden. Es gibt hier auch eine gut aufgestellte deutsche und europäische Industrie. Allerdings birgt die sehr hohe Nachfragebeschleunigung auch Gefahren. Die Heizungsindustrie ist also gut beraten, jetzt beherzt diese Transformation und Industrialisierung der Produktion mitzugehen. Als Institut haben wir in den letzten Jahren unter anderem ein Projekt zur Entwicklung eines Kältekreises – basierend auf dem nahezu klimaneutralen Kältemittel Propan – mit einem breiten Industriekonsortium sehr erfolgreich zum Abschluss gebracht. In einem Folgevorhaben wollen wir nun gemeinsam mit Wärmepumpenherstellern und der Wohnungswirtschaft Musterlösungen für Wärmepumpen in Mehrfamilienhäusern entwickeln, denn besonders für Gasetagenheizungen gibt es derzeit noch keinen adäquaten Ersatz.«

### Welche Rolle wird der Wasserstoff im künftigen Energiesystem spielen und wie wird das Fraunhofer ISE den Bereich weiterentwickeln?

*Henning:* »Bei allen Systemanalysen wird deutlich, dass man auch künftig für Bereiche, in denen direkte Stromnutzung – unter Einbeziehung von Kurzzeitspeicherung mit Batterien – nicht oder nur sehr aufwendig möglich ist, stoffliche Energieträger brauchen wird. Dazu gehören zum Beispiel der Luft- und Schiffsverkehr. Zudem wird Wasserstoff besonders für die Industriewende eine zentrale Rolle spielen, etwa in der



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

chemischen Industrie und der Stahlherstellung. Die Bedeutung von Forschung und Entwicklung wird hier also stark wachsen. Wir haben am Fraunhofer ISE ein breites FuE-Portfolio von der Herstellung von Wasserstoff mittels Elektrolyse über die Nutzung von Wasserstoff in Brennstoffzellen bis zur Weiterkonversion in unterschiedlichste Moleküle. Im riesigen Feld der Wasserstofftechnologien wird sich noch vieles entwickeln, was heute zum Teil noch gar nicht absehbar ist.

### Wie kann das Fraunhofer ISE ansonsten dazu beitragen, dass die Verkehrswende schneller gelingt?

*Henning:* »Die Elektromobilität wird einen wichtigen Beitrag leisten. Da ist eine der zentralen Fragen, wie die erforderliche Infrastruktur aussehen kann, um Fahrzeuge schnell und netzdienlich zu laden. Eine Entwicklung, die wir dafür mit unserem Industriepartner ADS-TEC getätigt haben, ist die ChargeBox, ein System, bei dem ein Batteriespeicher mit einer Ladeeinrichtung so kombiniert ist, dass es ohne Netzausbau möglich ist, Fahrzeuge schnell zu laden. Diese Lösung, bei der wir modernste Siliciumcarbid-Wechselrichter eingesetzt haben, war 2022 für den Deutschen Zukunftspreis nominiert.«

### Das Fraunhofer ISE hat »Stationäre Batteriespeicher« als ein Leitthema aufgesetzt. Was sind die Hintergründe?

*Bett:* »Wir sehen die Integration von elektrischen Speichertechnologien als den wichtigen nächsten Schritt beim Umbau des Energiesystems, da wir nun immer mehr fluktuierende Energien wie Wind und Sonne in das System bekommen. Wir wollen hier unseren technologischen Beitrag leisten, indem wir neue Batterietypen, beispielsweise Zink-Ionen-Batterien mit wässrigem Elektrolyten, entwickeln. Auch die Langlebigkeit und Recyclingfähigkeit sind aus Nachhaltigkeitsgründen für uns ein wichtiges Thema. Dazu entwickeln wir u. a. Testprozeduren weiter, um Defekte, die in Batterien entstehen, besser verstehen und beheben zu können. Besonders bei den Großbatterien geht es dann um Fragen wie die systemstabilisierende und versorgungssichernde Rolle im Energiesystem.«

### Wie kann das Fraunhofer ISE die Batterieforschung erfolgreich adressieren?

*Henning:* »Das Thema ist für uns sehr wichtig, daher haben wir in den letzten Jahren umfangreiche Laborinfrastruktur für die Batterieforschung aufgebaut. Wir nehmen derzeit sukzessive mehr als 8 500 m<sup>2</sup> Büro- und Laborfläche dafür in Betrieb. Hier wird zukünftig das gesamte Spektrum an Themen von neuartigen Batteriezellen über die Prozesstechnik und Herstellungsfragen bis zu gesamten Batteriesystemen einschließlich Fragen der Qualitätssicherung und Lebensdauer bearbeitet werden. Zu Fragen des Upscaling kooperieren wir eng mit der Forschungsfertigung Batteriezelle der Fraunhofer-Gesellschaft. Zu vielen weiteren Forschungsfragen, beispielsweise im Bereich der digitalen Modelle, arbeiten wir eng mit weiteren Instituten der Fraunhofer-Allianz Batterie zusammen.«

### Wie steht es bei den Batterien um die Technologiesouveränität?

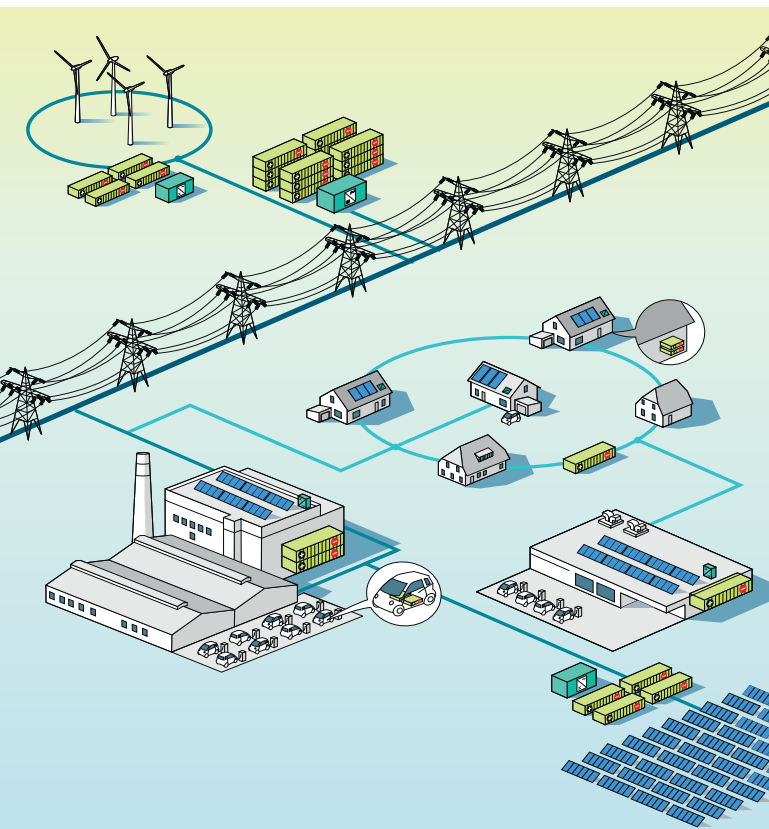
*Bett:* »In Deutschland und Europa wurden in den letzten Jahren erhebliche Aktivitäten zur Batteriefertigung initiiert, sodass es mittlerweile etliche Produzenten gibt, mit denen wir in Forschung und Entwicklung gut zusammenarbeiten können. Mit dem Einsatz von Silicium als Anodenmaterial haben wir bereits schöne Erfolge erzielen können.«

### Wie geht das Fraunhofer ISE generell das Thema Rohstoffkritikalität an?

*Bett:* »In unserer Institutsstrategie ist zirkuläre Wertschöpfung als Ziel verankert. Das umfasst die Wiederverwertung von Materialien oder Komponenten – von Second Life oder Re-Use über die komponentenweise Wiederverwendung bis hin zur Rückführung in die Materialkreisläufe. Es ist auch wichtig, sich die Verfügbarkeit von Materialien und gesamte Wertschöpfungsketten anzuschauen. Nachhaltigkeit endet für uns nicht bei Ressourcenfragen, sondern bezieht auch soziale Aspekte mit ein. Hier betreiben wir zwar keine eigene Forschung, können diese Fragen aber durch Kooperation mit kompetenten Partnern in die Analyse von Herstellprozessen miteinbeziehen.«



# Stationäre Batteriespeicher – Stabilität und Flexibilität im Energiesystem



Überblick zu den verschiedenen Einsatzmöglichkeiten von stationären Batteriespeichern.

Der steigende Anteil von regenerativ erzeugtem Strom und die damit verbundene Komplexität künftiger Energiesysteme erfordert neue Lösungsansätze für eine stabile und ausfallsichere Energieversorgung. Stationäre Energiespeicher leisten hierzu einen wesentlichen Beitrag: Sie stützen die Netze, beispielsweise durch Bereitstellung von Regelleistung, und können überschüssigen Strom, idealerweise aus Photovoltaik- oder Windanlagen, zwischenspeichern und bedarfsgerecht zur Verfügung stellen. Klar ist: Für eine sichere und zuverlässige Stromversorgung, basierend auf 100 % erneuerbarer Energie, benötigen wir stationäre Batteriespeicher in großem Umfang.

Am Fraunhofer ISE adressieren wir dieses Themengebiet mit unserem Leitthema [»Stationäre Batteriespeicher – Stabilität und Flexibilität im Energiesystem«](#). Unsere FuE-Aktivitäten erstrecken sich von den Batteriematerialien und Zellarchitekturen über die Batterietechnologie und Batteriesystemtechnik bis hin zu Fragestellungen der Speicheranwendungen sowie Forschungsthemen wie Leistungselektronik, Energiemanagementsysteme, Netzintegration und intelligente Netze. Die Analyse der Speicherbedarfe im Energiesystem bildet die Basis für die Schwerpunktsetzung unserer Arbeiten. Wissenschaftliche Tests und Prüfungen – sowohl auf Komponenten- als auch auf Systemebene – runden unser Angebot ab.

## Anwendungsgebiete für Batteriespeicher

[Heim Speicher](#) als kleinere, dezentrale Batteriespeicher sind längst State of the Art in Eigenheimen und dienen dort als Zwischenspeicher für PV-Strom, erzeugt auf dem Hausdach. Größer dimensionierte [Quartierspeicher](#), eingesetzt als Zwischenspeicher in Siedlungen und Wohnvierteln, ermöglichen die gemeinschaftliche Nutzung des lokal erzeugten Stroms.

Fallende Stromgestehungskosten bei erneuerbaren Energien und tendenziell sinkende Preise für Batterien einerseits und stark steigende Energiekosten und wachsende Unsicherheit an den etablierten Energiemärkten andererseits, machen [Commercial & Industrial \(C&I\)-Speicher](#) zunehmend interessant für den Einsatz in Industrie, Dienstleistung und Gewerbe. Unternehmen können sich mit eigenerzeugtem PV-Strom unabhängiger von volatilen Energiepreisen machen, eine zuverlässige Energieversorgung gewährleisten und zusätzlich einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Einsparung leisten.

In der [Studie »Batteriespeicher an ehemaligen Kraftwerksstandorten«](#) konnten wir zeigen, dass im starken Ausbau stationärer [Batterie-Großspeicher](#) ein enormes Potenzial zur Abdeckung des Speicherbedarfs liegt. Ferner können Batterie-Großspeicher auch direkt mit PV-Kraftwerken gekoppelt werden und so für eine bedarfsgerechte und ertragsoptimierte Einspeisung sorgen.

### Vorteile stationärer Batteriespeicher

Der Einsatz von stationären Batteriespeichern ermöglicht über alle Anwendungsbereiche hinweg die großflächige Integration von erneuerbaren Energien und bietet eine Reihe von Vorteilen. Je nach den anwendungsspezifischen Anforderungen können Batteriesysteme von einigen Kilowattstunden bis zu Gigawattstunden ausgelegt werden. Die Vorteile umfassen ökologische, technische und ökonomische Aspekte. Neben positiven Effekten für die Umwelt erhöhen sie die Akzeptanz der Energiewende innerhalb der Bevölkerung und eröffnen neue Geschäftschancen für die Betreiber von Batteriespeichern.



*Vogelperspektive auf das neue Zentrum für elektrische Energiespeicher im Freiburger Industriegebiet Haid.*



*Batteriespeicher in der Mehrfachnutzung: Zwischenspeicherung von Solarstrom zur Optimierung des Eigenverbrauchs sowie zur Kappung von Lastspitzen.*



# Symposium am Fraunhofer ISE: »Ist die Energiewende nachhaltig umsetzbar?«



**So wichtig Grundlagenforschung ist, allein reicht das nicht mehr aus. Wir müssen an den Problemen arbeiten, wir müssen Lösungen finden, dafür müssen wir zusammen denken und in die Umsetzung gehen. Inter- und Transdisziplinarität ist dafür essenziell und der erste Schritt mit der Gesellschaft.«**

**Prof. Dr. Daniela Kleinschmit**  
Prorektorin Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

»Ist die Energiewende nachhaltig umsetzbar?« Dieser Frage sind wir am Fraunhofer ISE anlässlich des 60. Geburtstags von Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Bett mit Fachvorträgen und einer Podiumsdiskussion nachgegangen. Vertreter und Vertreterinnen aus Wirtschaft, Wissenschaft und Sozialwissenschaften diskutierten, wie Nachhaltigkeit auf dem Weg zur Klimaneutralität sichergestellt werden kann. Im Mittelpunkt standen Fragen zum Ressourcenverbrauch, zur Auswahl geeigneter Rohstoffe sowie zu umweltverträglichen Produktionsverfahren und möglichen Ansätzen einer zirkularen Produktionsweise. Doch auch gesellschaftliche Herausforderungen und ethische Fragen auf dem Weg zu einer CO<sub>2</sub>-freien Energieversorgung erörterten die Teilnehmenden intensiv.

Ausgangspunkt bildete die Frage, was wir eigentlich heute unter »Nachhaltigkeit« verstehen – einem Begriff, den wir im Alltag inzwischen zwar nahezu inflationär gebrauchen, kaum aber hinterfragen. Prof. Dr. Daniela Kleinschmit, Prorektorin der Universität Freiburg, führte in ihrem Impulsvortrag aus, der Begriff sei vor ca. 300 Jahren in der Forstwirtschaft entstanden. Demnach müsse man das, was man dem Wald entnehme, auch wieder nachpflanzen – ein Ansatz, der sich jedoch kaum mit einem Wirtschaftsmodell vereinbaren lässt, das sich stetigem Wachstum verschrieben hat. Prof. Marc Oliver Bettzüge, Ökonom an der Universität Köln und Mitglied im Expertenrat für Klimafragen der Bundesregierung, gab folgerichtig zu bedenken, dass auch die Herstellung, die Wartung und der Rückbau von PV- und Windanlagen bislang nur als Fortsetzung extraktiver industrieller Prozesse beobachtet

Mehr Informationen



werden könne. Tatsächlich, so das erste Zwischenfazit der Diskutanten, sei jedoch die Etablierung einer wirklichen Kreislaufwirtschaft für die Zukunft der Menschheit ein immer entscheidenderer Faktor.

Das Fraunhofer ISE beschäftigt sich mit diesen Fragestellungen in mehrfacher Hinsicht: In der wirtschaftspolitischen Initiative [»Sustainable PV Manufacturing in Europe«](#) streben wir eine hochtechnologische und nachhaltige PV-Produktion entlang der gesamten Wertschöpfungskette an. Zum einen könnte damit – ein geostrategisches Ziel – die Unabhängigkeit von Importen im Energiesektor unterstützt werden, zum anderen – ein sozialer Aspekt – hätte dies die Schaffung zahlreicher Arbeitsplätze in der High-Tech-Branche zur Folge. Darüber hinaus könnten wir damit den Grundstein für eine Kreislaufwirtschaft im Sinne einer nachhaltigen Produktion legen. Dies bedeutet implizit, Lebenszyklusanalysen (Life Cycle Assessment, LCA), Lieferkettensicherheiten und Fragen der Herstellbedingungen in Forschung und Praxis zu verankern.

Auch dem Thema Recycling kommt eine Schlüsselrolle zu. Bedenkt man, dass Materialien wie beispielsweise Lithium nur sehr aufwändig recyclebar sind, wird deutlich, dass die Forschung künftig verstärkt an neuen Materialien und Technologien arbeiten muss, die Energiewende also auch eine »Materialwende« sein muss, wie Prof. Dr. Anke Weidenkaff, Leiterin Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS postulierte.

*Abbildungen von links nach rechts:*

*Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Bett mit Ehefrau Andrea Bett.*

*Podiumsdiskussion des Fraunhofer ISE. V.l.n.r.:*

*Prof. Dr. Anke Weidenkaff (Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS), Prof. Dr. Daniela Kleinschmit (Albert-Ludwigs-Universität Freiburg), Prof. Dr. Jan-Christoph Goldschmidt (Philipps-Universität Marburg), Prof. Dr. Darrel Möllendorf (Goethe-Universität Frankfurt), Bernward Janzing (Moderator).*

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

Doch nicht nur technologische und ökonomische Fragestellungen gilt es zu diskutieren: Aufgabe der Wissenschaft sei es mehr denn je, Ergebnisse in Gesellschaft und Politik zu transferieren, wie Prof. Dr. Jan-Christoph Goldschmidt von der Universität Marburg betonte. Prof. Dr. Darrel Möllendorf von der Universität Frankfurt stellte fest, die aktuelle Debatte offenbare einen Interessenkonflikt zwischen der Pflicht, die Lebensgrundlage künftiger Generationen zu erhalten einerseits und der Pflicht, der Armut im heutigen globalen Süden entgegenzuwirken, andererseits. Vor diesem Hintergrund wird deutlich, dass die [Akzeptanz – und somit das Gelingen – der Energiewende](#) auch wesentlich damit zu tun hat, unsere eigenen Gewohnheiten und Denkmuster kritisch zu hinterfragen.

# Silicium-Photovoltaik



**Mit unserer Forschung zur Feinlinien-Metallisierung von Solarzellen wollen wir die Photovoltaik noch effizienter, günstiger und nachhaltiger gestalten.»**

**Katharina Gensowski M. Sc.**  
Mitarbeiterin Silicium-Photovoltaik

## Position im Markt

Über 95 % 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. Besonders 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 3 000 m<sup>2</sup> Labor- und Technikumsfläche, beispielsweise in unseren industriennahen Technologiezentren [PV-TEC](#) und [SIM-TEC](#) sowie dem Reinraum im [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.

## Leitung

Dr.-Ing. Ralf Preu, Telefon +49 761 4588-5260  
Prof. Dr. Stefan Glunz, Telefon +49 761 4588-5191

## Eckdaten

|                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|  Mitarbeitende                   | 289 |
|  Zeitschriften- und Buchbeiträge | 56  |
|  Vorträge und Konferenzbeiträge  | 50  |
|  Patent-Erstanmeldungen          | 6   |

## Ausgewählte Projekte 2022

-  [Sustainable PV Manufacturing in Europe – An Initiative for a 10GW GreenFab](#)
-  [PrEsto – Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen: Entwicklung skalierbarer Prozesstechnologien](#)
-  [NextTec – Hocheffiziente Solarzellen doppelt so schnell produzieren](#)
-  [FoilMet® – Ressourcenschonende, flexible Solarzellen-Verschaltung durch Laser-Mikrofügen](#)
-  [PERC-Solarzellen aus 100 Prozent recyceltem Silizium](#)
-  [Bestimmung des theoretischen Wirkungsgradmaximum von Siliciumsolarzellen](#)

Mehr Informationen zu  
diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu  
diesem Geschäftsfeld



# III-V- und Konzentrator-Photovoltaik



**Mit siliciumbasierten III-V-Tandemzellen erreichen wir Rekordwirkungsgrade von 35,9 %. Hierdurch benötigen wir viel weniger Solarflächen.»**

**Patrick Schygulla**  
Doktorand III-V- und  
Konzentrator-Photovoltaik

## Position im Markt

Im Bereich der III-V-Halbleitersolarzellen arbeiten wir an der effizientesten PV-Technologie und suchen nach wirtschaftlich attraktiven Lösungen. Unsere II-V/Si-Tandemsolarzellen wandeln bis zu 35,9 % des Sonnenlichts in Strom um. Für konzentriertes Licht entwickeln wir Vierfachsolarzellen mit bis zu 47,6 % Wirkungsgrad. Dies sind internationale Spitzenwerte für die III-V-Photovoltaiktechnologie, die sich durch höchste Leistung und Langzeitstabilität auszeichnet.

Ein Fokus unserer Forschung liegt in der Kostenreduktion durch neue Fertigungsverfahren. So wollen wir in Zukunft attraktive Lösungen für Massenmärkte, z.B. die E-Mobilität, generieren. In der konzentrierenden Photovoltaik entwickeln wir Mikro-CPV-Module, bei denen neue parallelisierte Herstellungsverfahren sowie die Selbstausrichtung von miniaturisierten Bauteilen genutzt werden. Unser Ziel sind wirtschaftliche Lösungen für höchsteffiziente PV-Systeme, z. B. für Ballungsräume mit begrenzter Fläche. Im Bereich der III-V-Laserleistungszellen ermöglichen wir neue Anwendungen für Telekommunikationswellenlängen, u.a. für die Sensorik in passiven optischen Netzen.

## Leitung

Dr. Frank Dimroth  
Telefon +49 761 4588-5258

## Eckdaten

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|  Mitarbeitende                   | 46 |
|  Zeitschriften- und Buchbeiträge | 15 |
|  Vorträge und Konferenzbeiträge  | 18 |
|  Patent-Erstanmeldung            | 1  |

## Ausgewählte Projekte 2022



50Prozent/50Percent – Monolithische III-V-Mehrfachsolarzellen mit über 50 % Wirkungsgrad unter konzentrierter Einstrahlung



H2Demo – Entwicklung von Demonstratoren zur direkten solaren Wasserspaltung



QuintuMod – Entwicklung eines kostengünstigen und gleichzeitig hocheffizienten Solarmoduls unter Verwendung einer 5fach-Stapelsolarzelle



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



Hiperion – Hybrid Photovoltaics for Efficiency Record Using Integrated Optical Technology

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu diesem Geschäftsfeld



# Perowskit- und Organische Photovoltaik



**Die Nutzung transparenter Solarzellen in Fenstern und Folien bietet dem Bau-sektor und der Landwirtschaft spannende Optionen für eine erfolgreiche und bezahlbare Energiewende.«**

**Dmitry Bogachuk**  
Wissenschaftlicher Mitarbeiter  
Perowskit- und Organische  
Photovoltaik

## Position im Markt

Der Wirkungsgrad von Perowskitsolarzellen kann insbesondere durch Tandemsolarzellen aus zwei verschiedenen Perowskit-absorbieren weiter gesteigert werden. Ziel des Fraunhofer ISE ist, dieses Potenzial unter Beachtung der Faktoren Hochskalierbarkeit, Langzeitstabilität und Herstellungskosten zu realisieren. Daneben untersuchen wir auch die Kombination von Perowskiten und Silicium für hocheffiziente Tandemzellen.

In der organischen Photovoltaik arbeiten wir intensiv daran, die einzigartigen optischen Eigenschaften organischer Halbleiter zu nutzen. Sie können – bei gleichzeitig hoher Transparenz im sichtbaren Spektralbereich – den nahinfraroten Spektralbereich stark absorbieren. Dies ermöglicht die Herstellung von effizienten organischen Solarmodulen mit hoher visueller Transparenz. Im Gegensatz zu Modulen mit opaken Solarzellen, bei denen durch Lücken eine gewisse Transparenz geschaffen wird, eröffnet ihr ästhetisches, homogenes Erscheinungsbild neue großflächige Anwendungspotenziale – besonders in Gebäuden und der Landwirtschaft. Dabei kommt der organischen Photovoltaik ihre leichte Integrierbarkeit zugute.

## Leitung

Dr. Uli Würfel  
Telefon +49 761 203-4796

## Eckdaten

|                                                                                     |                                 |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|----|
|  | Mitarbeitende                   | 37 |
|  | Zeitschriften- und Buchbeiträge | 23 |
|  | Vorträge und Konferenzbeiträge  | 19 |

## Ausgewählte Projekte 2022



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



[Durchblick-PV – Entwicklung von organischen Solarmodulen mit hoher visueller Transparenz](#)



[PeroTec Effizienz Phase 1 – Entwicklung von Prozesstechnologie für hocheffiziente langzeitstabile Perowskitsolarzellen nach dem PeroTecTM-Verfahren](#)



[SuPerTandem – Flexible Perowskit-Perowskit-Tandemphotovoltaik](#)



[DIAMOND – Perowskit-Photovoltaik mit minimiertem ökologischen Fußabdruck](#)

Mehr Informationen zu  
diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu  
diesem Geschäftsfeld



# Photovoltaische Module und Kraftwerke

---



**Mit der Forschung an innovativen, ressourcenschonenden Modultechnologien wie dem leitfähigen Kleben stärken wir die Position unserer Industriepartner am Markt.»**

**Torsten Rößler**  
Gruppenleiter Photovoltaische  
Module und Kraftwerke

## Position im Markt

Mit dem Erneuerbare-Energien-Gesetz (EEG) 2023 hat erstmals eine deutsche Bundesregierung langfristige und ambitionierte Ziele für die PV-Installation im Dienst der Energiewende definiert. Die so geschaffene Planungssicherheit hilft allen Akteuren der PV-Branche. Klar ist beispielsweise, dass die Produktionskapazitäten in Deutschland und Europa für jährliche Zubauten von bis zu 22 GW<sub>p</sub> massiv ausgebaut werden müssen. Mit Technologieentwicklungen wie dem leitfähigen Kleben und der Matrixschindel-Verbindung unterstützen wir unsere Partner im Maschinenbau und in der Modulproduktion beim Erreichen höchster Wirkungsgrade.

Für den schnell wachsenden PV-Kraftwerkspark entwickeln wir präzise Werkzeuge zur Qualitätssicherung von Modulen und Anlagen sowie zur digitalen Betriebsführung und Leistungsprognose. Photovoltaik benötigt viel Fläche – unsere Ansätze zur Integration und doppelten Flächennutzung gehen einher mit optimierten Moduldesigns, Montagekonstruktionen, Potenzialanalysen und Zuverlässigkeitsprüfungen. So entstehen Synergien zum Nutzen von Landwirtschaft, Gewässerökologie, Gebäuden und Fahrzeugen.

## Leitung

Dr. Harry Wirth  
Telefon +49 761 4588-5747

## Eckdaten

|                                                                                     |                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----|
|  | Mitarbeitende                   | 217 |
|  | Zeitschriften- und Buchbeiträge | 17  |
|  | Vorträge und Konferenzbeiträge  | 51  |
|  | Patent-Erstanmeldungen          | 6   |

## Ausgewählte Projekte 2022

 [GEPARD – Hochdurchsatz-Anlagen- und Prozessstechnologie für kristalline Solarmodule](#)

 [CTS1000+ – Mehr Energie pro Zelleistung – ganzheitliche Cell-To-System Modulertragssteigerung](#)

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

 [APV-MaGa – Agri-Photovoltaik für Mali und Gambia: Nachhaltige Stromproduktion durch integrierte Nahrungsmittel-, Energie- und Wassersysteme](#)

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

 [Lade-PV – Entwicklung von fahrzeugintegrierter Photovoltaik für das On-Board-Laden von Elektro-Nutzfahrzeugen](#)

 [PV2Go – Solarpotentiale deutscher Verkehrswege](#)

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu diesem Geschäftsfeld



# Energieeffiziente Gebäude

---



**Wir sind überzeugt, dass wir bei der Wärmeversorgung der Zukunft auf die Nutzung von Umweltwärme und *grünem* Strom setzen sollten.»**

**Theresa Paul**  
Wissenschaftliche  
Mitarbeiterin Wärme-  
und Kältetechnik

## Position im Markt

Die dramatischen Ereignisse des Kriegs in der Ukraine wirken sich mit Verknappung des gerade in der Wärmebereitstellung dominierenden Erdgases in hohem Maße auf den Wärmemarkt aus. Eine Beschleunigung der Umstellung auf erneuerbare Energieträger wird nicht nur aus Gründen des Klimaschutzes, sondern auch unter dem Aspekt der Versorgungssicherheit dringlicher.

Die Herausforderung besteht darin, hierfür Lösungsansätze bereitzustellen, die eine große Bandbreite an Akteuren adressiert: Technologien für die nicht fossile Wärmeerzeugung, Transformationskonzepte für Wohnungswirtschaft, Industrie und Wärmeversorger sowie die Digitalisierung in Handwerk und Planung.

Die Steigerung der Produktivität im Bauwesen und insbesondere des Sanitär- und Heizungshandwerks kann durch eine Digitalisierung der Prozesse erreicht werden. Aktuell arbeiten wir an der automatisierten Bestandsaufnahme und Angebotserstellung. Damit der beschleunigte Hochlauf der Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln gelingen kann, unterstützen wir technologisch die Entwicklung optimierter Kältemittelkreise.

## Leitung

Dr. Peter Schossig  
Telefon +49 761 4588-5130

## Eckdaten

|                                                                                     |                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----|
|  | Mitarbeitende                   | 132 |
|  | Zeitschriften- und Buchbeiträge | 17  |
|  | Vorträge und Konferenzbeiträge  | 25  |
|  | Patent-Erstanmeldung            | 2   |

## Ausgewählte Projekte 2022



[KETEC – Forschungsplattform  
Kälte- und Energietechnik](#)



[FernWP – Fern- und Prozesswärme-  
versorgung durch Wärmepumpen  
als Ersatz der Kohleverbrennung](#)



[BIPV-Initiative Baden-Württemberg  
\(Bauwerkintegrierte Photovoltaik\)](#)



[AI4HP – Künstliche Intelligenz  
für Wärmepumpen](#)



[LC 150 – Entwicklung eines kältemittelredu-  
zierten Wärmepumpenmoduls mit Propan](#)

Mehr Informationen zu  
diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu  
diesem Geschäftsfeld



# Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse

---



**Wärmepumpen für hohe Temperaturen und Leistungen haben das Potenzial, den industriellen Wärmebedarf zu dekarbonisieren.«**

**Hannah Teles de Oliveira**  
Doktorandin Solarthermische Kraftwerke und Industrieprozesse

## Position im Markt

Die Entwicklungen am Energiemarkt stellen Haushalte und heimische Industrie vor große Herausforderungen. Zugleich werden erneuerbare Lösungen ökonomisch attraktiver. Neben kurzen Amortisationszeiten bieten sie eine weitgehende Unabhängigkeit von zukünftigen Entwicklungen, Planbarkeit der Kosten sowie, in Verbindung mit Speichern, eine hohe Versorgungssicherheit. Kombiniert mit Effizienzmaßnahmen und Abwärmenutzung können besonders hybride Konzepte, die die Vorteile verschiedener Technologien kombinieren, zur Wärmewende in der Industrie beitragen. So existieren schon heute technisch ausgereifte Lösungen für erneuerbare Wärme bis zu etwa 250 °C, z. B. für die Versorgung industrieller Dampfnetze. Mit Arbeiten zu Solarthermie, Hochtemperatur-Wärmepumpen und thermischen Speichern unterstützen wir die Industrie auf ihrem Weg zur Klimaneutralität, damit sie sich auch in Zukunft erfolgreich im internationalen Wettbewerb behaupten kann.

Ein weiteres zentrales Thema unserer Arbeiten ist Ressourceneffizienz. Hierfür entwickeln wir z. B. Membranverfahren für die Rückgewinnung von Wertstoffen aus industriellen Abwässern sowie zur Gewinnung wertvoller Rohstoffe aus natürlichen Solen.

## Leitung

Dr. Peter Nitz  
Telefon +49 761 4588-5410

## Eckdaten

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|  Mitarbeitende                   | 65 |
|  Zeitschriften- und Buchbeiträge | 7  |
|  Vorträge und Konferenzbeiträge  | 11 |

## Ausgewählte Projekte 2022

-  [AVUSpro – Automatisierte in situ Messung von Verschmutzung zur Standortbewertung und im Betrieb solarthermischer Kraftwerke](#)
-  [Polyphem – Entwicklung eines kleinskaligen Solar-Kombikraftwerks \(Gasturbine/ORC\)](#)
-  [SOLBEADO – Entwicklung und Testen von Sekundärreflektoren für ein Beam-Down-Turmkraftwerk](#)
-  [SmartCSP – Anwendung von KI-Methoden zur Verbesserung von Betrieb und Wartung von CSP-Kraftwerken](#)
-  [FENOPTHEs – Füllkörperentwicklung und Optimierung für thermische Speicher](#)
-  [Optimus – Entwicklung, Optimierung und Anwendung von PCM-Emulsionen mit hoher thermischer Speicherdichte](#)
-  [SEArcularMINE – Rohstoffgewinnung aus Meerwasserkonzentrat](#)

Mehr Informationen zu  
diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu  
diesem Geschäftsfeld



# Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme



**Die intelligente Integration  
dezentraler Ressourcen in das  
Energiesystem ist für eine  
erfolgreiche Energie- und  
Wärmewende unumgänglich.«**

**Jasmin Montalbano**  
Wissenschaftliche Mitarbeiterin  
Netzbetrieb und Netzplanung

## Position im Markt

Im Geschäftsfeld »Leistungselektronik, Netze und Intelligente Systeme« befassen wir uns mit innovativen Technologien zur Transformation des elektrischen Energiesystems. Dazu bedarf es einer eingehenden Analyse des heutigen Energiesystems, zu dessen Transparenz wir auch in der Öffentlichkeit mit unserem Online-Auswertungstool »[Energy-Charts](#)« beitragen. Mit der [aktuellen Studie](#) zu den Stromgestehungskosten ermitteln wir die Kosten der verfügbaren Erzeugungstechnologien und erforschen den Trend für die Kostendegression. Diese bilden die Grundlage für Transformationsszenarien, die wir mit unserem [REMod-Simulationswerkzeug](#) entwickeln. Die aktuelle [REMod-Studie](#) zeigt auf, wie wir kostenoptimal und mit breiter gesellschaftlicher Akzeptanz zu einem emissionsfreien Energiesystem gelangen.

Aufgrund der zunehmenden Sektorenkopplung wird das Stromnetz zur Drehscheibe für die Einbindung der erneuerbaren Energien. Die dafür notwendige Digitalisierung erfolgt mithilfe der Leistungselektronik und Smart-Grid-Technologien.

## Leitung

Prof. Dr. Christof Wittwer  
Telefon +49 761 4588-5115

## Eckdaten

|                                                                                     |                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----|
|  | Mitarbeitende                   | 142 |
|  | Zeitschriften- und Buchbeiträge | 17  |
|  | Vorträge und Konferenzbeiträge  | 35  |

## Ausgewählte Projekte 2022

-  [MS-LeiKra – Leistungselektronik für die nächste Generation von Mittelspannungs-PV-Kraftwerken](#)
-  [power4re – Zuverlässige Umrichter für die regenerative Energieversorgung](#)
-  [VerbundnetzStabil - Stabiles Verbundsystemverhalten bei umrichterbasierter Erzeugung](#)
-  [EnStadt:Pfaff – Dezentrales Energiemanagement vom Smart Home bis ins Quartier](#)
-  [IND-E – Dekarbonisierungs- und Elektrifizierungspotentiale in der deutschen Industrie](#)
-  [TransDE – Transformation der Infrastruktur Deutschlands bis zum Jahr 2050 im Einklang mit der Energiewende aller Verbrauchssektoren](#)
-  [InteRessE – Ressourcenbedarf für die Energiewende](#)

Mehr Informationen zu  
diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu  
diesem Geschäftsfeld



# Wasserstofftechnologien



**Wir untersuchen die Zusammenhänge zwischen Materialeigenschaften, Produktionsprozessen, Mikrostrukturen und dem Betriebsverhalten von Brennstoffzellen.«**

**Neethu Thombra**  
Mitarbeiterin Brennstoffzellensysteme

## Position im Markt

Als nachhaltiger Energieträger bietet Wasserstoff ein enormes Potenzial für das globale Energiesystem der Zukunft. Mit grünem Strom produziert, nimmt er eine Schlüsselrolle für den Aufbau klimaneutraler Industrieprozesse und nachhaltiger Mobilität sowie einer flexiblen Stromerzeugung ein. Entsprechend dynamisch ist die globale Marktentwicklung von Wasserstoffanwendungen.

Wir begleiten diese Prozesse mit der Entwicklung effizienter Technologien über die gesamte Wertschöpfungskette und bringen sie über Dienstleistungsangebote direkt zur Anwendung. Zusätzlich führen wir Lebenszyklusanalysen durch, um die Treibhausgaspotenziale verschiedener Verfahren zu ermitteln sowie die Kosten der Wasserstoffprodukte zu berechnen. Mit den Ergebnissen dieser Forschungs- und Projektarbeit tragen wir zum Gelingen der globalen Energiewende durch die Entwicklung einer nachhaltigen, internationalen Wasserstoffwirtschaft bei.

## Leitung

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

## Eckdaten

|                                                                                     |                                 |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------|-----|
|  | Mitarbeitende                   | 133 |
|  | Zeitschriften- und Buchbeiträge | 10  |
|  | Vorträge und Konferenzbeiträge  | 17  |
|  | Patent-Erstanmeldungen          | 2   |

## Ausgewählte Projekte 2022



[CINES – Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems CINES](#)



[H2Carsharing – Erprobung von FCEV im Carsharing](#)



[Carbon2®Chem Phase 2](#)



[FC-CAT – Brennstoffzellen CFD und Through-Plane-Modellierung](#)



[FC-RAT – Realistische Alterungstrendmodellierung von Brennstoffzellen](#)

Mehr Informationen zu  
diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu  
diesem Geschäftsfeld



# Elektrische Energiespeicher

---



**Die Sicherheit von Batterien ist eine wichtige Voraussetzung für den Erfolg der Energie- und Verkehrswende. Wir forschen, um sie stetig zu verbessern.«**

**Dr. Nina Kevlishvili**  
Projektleiterin  
Batteriesystemtechnik

## Position im Markt

Die technologischen Anforderungen an Batterien steigen kontinuierlich: Die anstehende Verkehrswende, Energieversorgungssysteme mit hohen Anteilen erneuerbarer Stromerzeuger sowie die massive Zunahme portabler Geräte sind dabei wesentliche Faktoren. Besonders die Entwicklung eines nachhaltigen Verkehrssektors mit seinen vielfältigen Marktsegmenten – elektrische Leichtfahrzeuge, Elektroautos, elektrische und hybride Nutzfahrzeuge sowie die Elektrifizierung des Luft- und Schiffsverkehrs – erfordert technische Innovationen.

An unserem neuen Standort »Haidhaus« mit einer Laborfläche von rund 5 500 m<sup>2</sup> entwickeln wir hocheffiziente, sichere und zuverlässige Batterien für all diese Anwendungen. Unsere Forschung erstreckt sich entlang der gesamten Wertschöpfungskette – von den Materialien und Zellen über die Batteriesystemtechnik bis hin zu Speichieranwendungen. Darüber hinaus bieten wir umfangreiche Tests und Prüfungen an. Angesichts eines weltweit wachsenden Bedarfs an Lithium-Ionen-Batterien sowie der Rohstoffabhängigkeiten messen wir dem Aufbau einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft dabei eine ebenso große Bedeutung zu wie der Erforschung von alternativen Technologien, z. B. der von uns mitentwickelten Zink-Ionen-Batterien.

## Leitung

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

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

## Eckdaten

|                                                                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|  Mitarbeitende                   | 70 |
|  Zeitschriften- und Buchbeiträge | 3  |
|  Vorträge und Konferenzbeiträge  | 16 |

## Ausgewählte Projekte 2022



[SICOM-LIB – Siliciumkomposit-Anodenmaterialien für Lithium-Ionen-Batterien](#)



[ecoLEPuS – Second-Life-Batterien für den Einsatz in Hochleistungsanwendungen am Beispiel des Pufferspeichers in der Ladeinfrastruktur](#)



[PIONEER – Airport Sustainability Second Life Battery Storage](#)



[SIMBA – Natrium-Ionen- und Natrium-Metall-Batterien für effiziente und nachhaltige Energiespeicher der nächsten Generation](#)



[FLiBatt – Feste Lithiumbatterien mit Vliesstoffen](#)



[EMILAS – Elektromobilität in Mehrfamilienhäusern durch intelligente Ladestationen mit 2nd life Batteriespeicher](#)



[ResHy – Ressourcenschonende Hybridbatterie – Bau, Integration und Betriebsoptimierung](#)

Mehr Informationen zu diesen und weiteren Projekten



Mehr Informationen zu diesem Geschäftsfeld





# Das neue Zentrum für elektrische Energiespeicher



*Personenschleuse zum An- und Ablegen der persönlichen Schutzausrüstung (oben); Prozessierung von Pulvern und Anmischen von Elektroden-Slurries sowie Herstellung neuartiger siliciumbasierter Aktivmaterialien (Mitte); Zyklisierung von Lithium-Ionen-Testzellen an einem Zelltester (unten).*

Seit einigen Jahren arbeitet das Fraunhofer ISE an der Umsetzung einer FuE-Strategie für Batterien entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Nach einer mehrjährigen Planungs- und Bauphase war es nun endlich so weit: Anfang 2022 konnte die erste Arbeitsgruppe unseren neuen Standort, das »Haidhaus«, wie unser neues »Zentrum für elektrische Energiespeicher« mittlerweile im Innen- und Außenraum bezeichnet wird, beziehen. In diesem Gebäude, gelegen im Freiburger Süden, werden wir zukünftig unter einem Dach an innovativen Batteriematerialien und -zellen forschen, an optimierten Lösungen für Batteriesysteme und deren Integration in die verschiedensten Anwendungen arbeiten sowie im Rahmen der Qualitätssicherung umfangreiche wissenschaftliche Tests und Prüfungen an Zellen, Modulen und Systemen durchführen.

Im Fokus unserer Arbeiten auf der Material- und Zellebene stehen die Erschließung von – noch immer – großen Optimierungspotenzialen im Bereich der Lithium-Ionen-Technologie. Dies betrifft beispielsweise den Einsatz von siliciumbasierten Anodenmaterialien oder Kathodenmaterialien mit höherer spezifischer Kapazität sowie die Erforschung von Ansätzen im Bereich der Festkörperbatterien. Besonders für stationäre Anwendungen gibt es eine ganze Reihe von alternativen innovativen Technologien, die sich teilweise noch auf einem niedrigen Technology Readiness Level (TRL), teilweise aber auch schon kurz vor Markteintritt befinden. Dazu gehört beispielsweise die von uns mitentwickelte Zink-Ionen-Batterie.

Auf Systemebene kümmern wir uns um zentrale Fragestellungen für die Entwicklung von sicheren, zuverlässigen und hoch performanten Batteriespeichern. Dazu zählen die Aufbau- und Verbindungstechniken, das thermische Management und die Verwendung von [propagationshemmenden Materialien](#) ebenso wie effiziente Batteriemanagementsysteme mit präzisen Algorithmen für Zustandsbestimmung und Lebensdauerprognose. Da der Alterung in diesem Zusammenhang eine besondere Bedeutung zukommt, untersuchen wir im Labor sowie mithilfe unserer Simulationsmodelle die Alterungsmechanismen und die Einflüsse verschiedener Einsatzbedingungen und



*Prozesskette zur Herstellung von Batteriezellen  
mit Festkörper-Elektrolyt vom Pulver zur Zelle  
innerhalb einer Glovebox-Linie.*

Betriebsweisen. Neben den gängigen Lithium-Ionen-Batterien erforschen wir in unseren Projekten auch Alternativen wie Natrium-Ionen-Batterien, z.B. im Rahmen des EU-Projekts [»Simba«](#).

Batterien werden mittlerweile in einer Vielzahl von Anwendungen mit sehr unterschiedlichen Anforderungen genutzt. Daher beschäftigen wir uns im Bereich der Systemintegration und [Speichernutzung](#) mit der Technologieauswahl, der simulationsbasierten Systemauslegung und Entwicklung von optimierten Strategien zur Speicherbetriebsführung. Darüber hinaus arbeiten wir in unseren neuen Laboren am Aufbau von Systemlösungen, begleiten Feldprojekte und bieten wissenschaftliches Monitoring sowie die Analyse von Betriebsdaten im Rahmen einer ganzheitlichen Qualitätssicherung.

Die rasante technologische Entwicklung im Bereich der gängigen und innovativen Batterien erfordert fortwährend umfangreiche Tests und Prüfungen. Um diesem Bedarf gerecht zu werden, haben wir hierfür unsere Laborinfrastruktur am neuen Standort deutlich ausgebaut. So sind wir nun in der Lage, Batteriezellen, -module und -systeme in deutlich größerer Anzahl Performance- und Alterungstests zu unterziehen sowie Methoden zur Qualitätssicherung für die Zellproduktion und für die [Verlängerung der Nutzungsphase](#) zu entwickeln. Ferner können wir die Batterien am neuen Standort nach gängigen Normen und Standards sowie kundenspezifisch auf ihre Sicherheit untersuchen.

## Kontakt

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



**Für das Gelingen  
der Energie- und  
Verkehrswende  
sind Batterien  
eine Schlüssel-  
komponente.**

**Das Fraunhofer ISE  
arbeitet anwen-  
dungsorientiert an  
Lösungen entlang  
der gesamten Wert-  
schöpfungskette.«**



**Dr. Nicole Hoffmeister-Kraut**  
Ministerin für Wirtschaft, Arbeit  
und Tourismus des Landes  
Baden-Württemberg

# 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 Institut 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 50 ff](#)).

In unseren acht Laborzentren und vier produktionsnahen Technologie-Evaluationszentren entwickeln wir neue Produkte, Verfahren und Dienstleistungen und optimieren bestehende. Im vergangenen Jahr haben wir unsere Tätigkeiten im neuen Zentrum für elektrische Energiespeicher aufgenommen ([Seiten 46/47](#)).

## Technologie-Evaluationszentren

SIM-TEC – Silicon Materials Technology Evaluation Center



PV-TEC – Photovoltaic Technology Evaluation Center

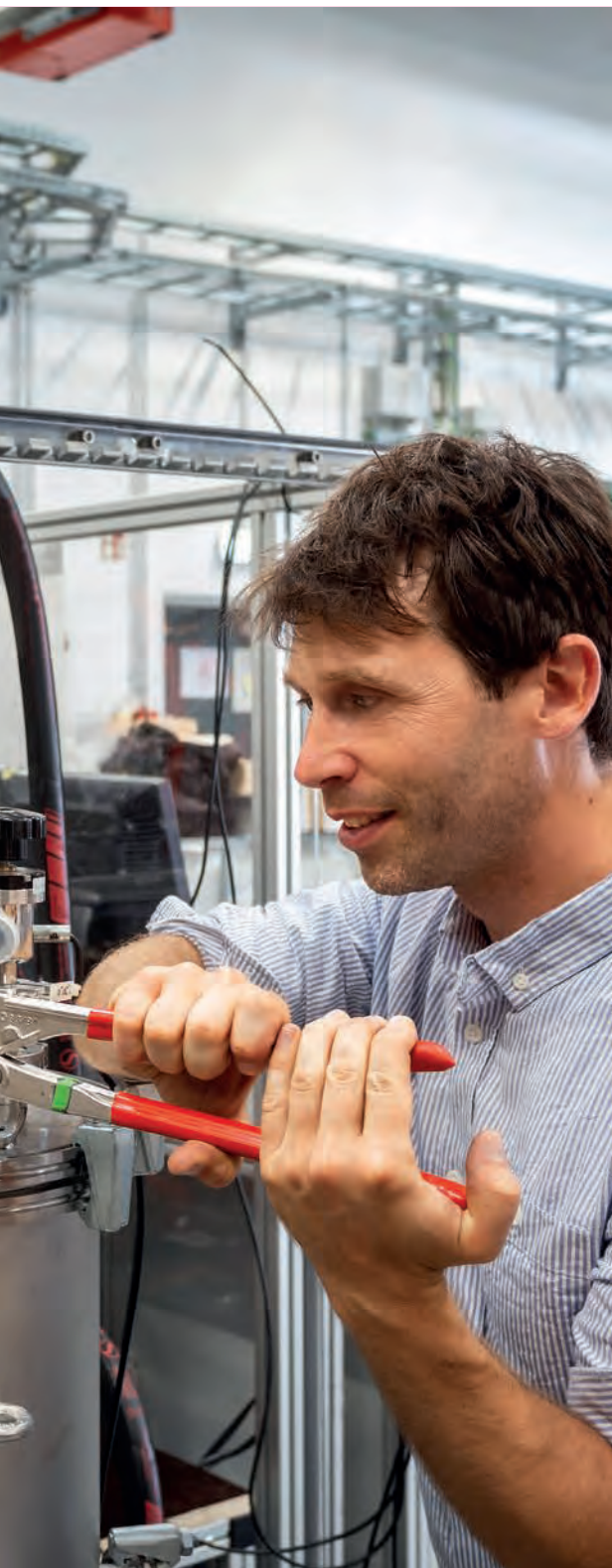


Module-TEC – Module Technology Evaluation Center



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



*Teststand zur Charakterisierung  
von Adsorptionswärmepumpen.*

# Akkreditierte Labors

CalLab  
PV Cells



## Kalibrierung von Solarzellen

### Silicium-, Dünnschicht-, Perowskit-, organische Solarzellen

Dr. Jochen Hohl-Ebinger  
Telefon +49 761 4588-5359

Wendy Schneider  
Telefon +49 761 4588-5146

### Mehrfach- und Konzentratorzellen

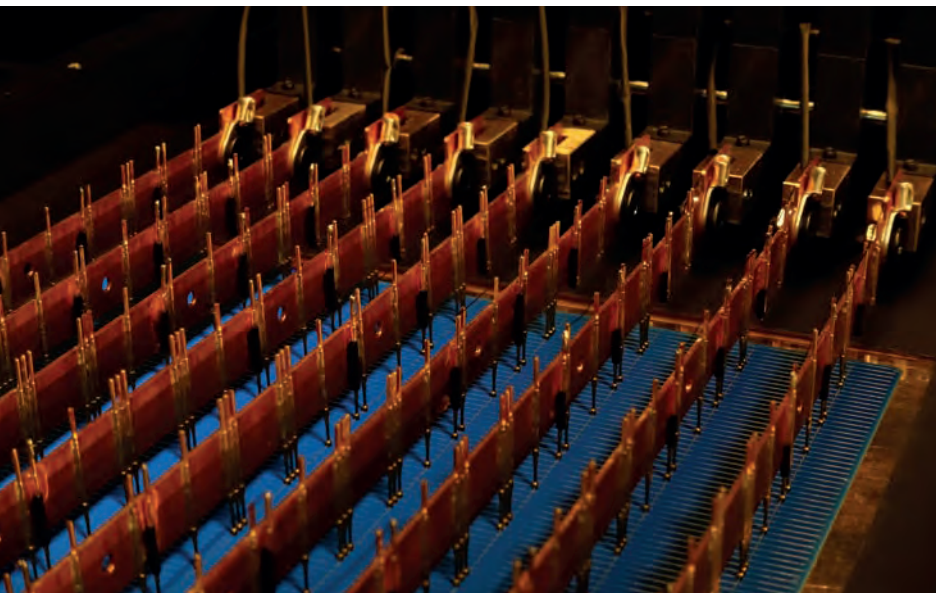
Dr. Gerald Siefer  
Telefon +49 761 4588-5433

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

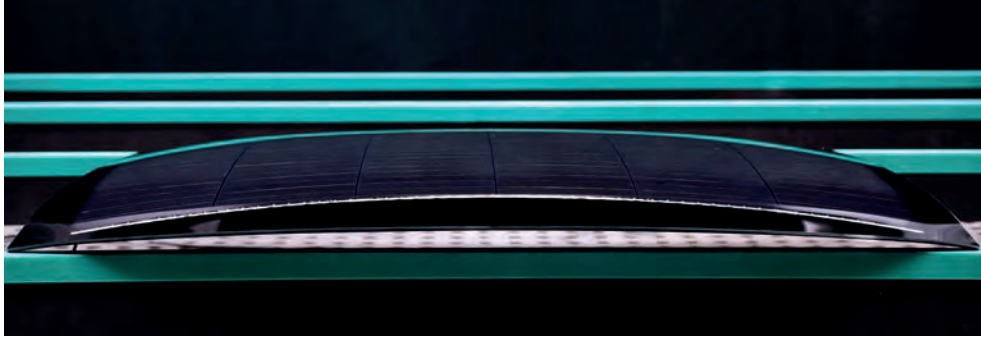
Im [CalLab PV Cells](#) bieten wir die Kalibrierung von Solarzellen verschiedenster PV-Technologien an. Es ist bei der Deutschen Akkreditierungsstelle DAkkS akkreditiert und zählt zu den weltweit führenden PV-Kalibrierlabors. In Kooperation mit Photovoltaikherstellern und mit Unterstützung des Bundesministeriums 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.



*Messung einer  
Multi-Busbar-Zelle.*



Vorbehandlung eines VIPV-Moduls  
für die Leistungsmessung.



## Kalibrierung und Performance-Tests von PV-Modulen

Im [CallLab 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 Bezugsnormale 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-Silizium-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)



## 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

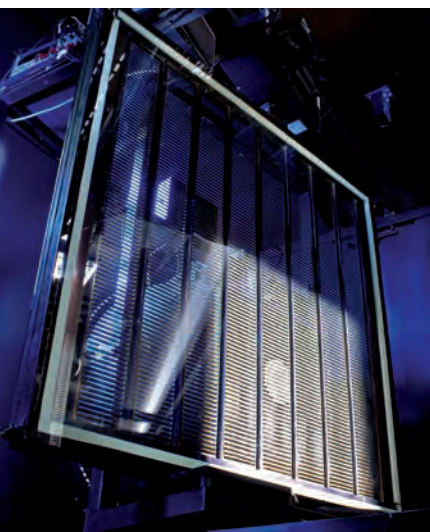
[tlpv@ise.fraunhofer.de](mailto:tlpv@ise.fraunhofer.de)



Für die Zertifizierung werden die PV-Module auf Zuverlässigkeit, Qualität und Sicherheit geprüft.



*Teiltransparenter Fassadenkollektor während der Transmissionsmessung im TestLab Solar Façades.*



*Schublastprüfung eines Gesamtsystems am Belastungsprüfstand aus zwei Kollektoren mit Montagesystem inklusive Tragwerksanbindung bis zum Dachsparren.*



### 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 Prüfmethoden 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)



### 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 +60 °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)

## TestLab

Heat Pumps  
and Chillers



### 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 m³/h bis 5 000 m³/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.

Dipl.-Ing. Ivan Malenković  
Telefon +49 761 4588-5533  
Mobil +49 162 205 3924

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



*Kalibrierung der Lufttemperatur- und Luftfeuchtemessgeräte in der kalorimetrischen Klimakammer.*

### 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« zurückgegriffen 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 Schwingkreis-Testeinrichtung 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.

## TestLab

Power Electronics



Steffen Eyhorn  
Telefon +49 761 4588-5957

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

*Multi-Megawattlabor am Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze.*



# Highlights unserer Forschung

---





**Nachhaltigkeit auch in  
FuE-Aktivitäten umzu-  
setzen, ist eines unserer  
wichtigsten Ziele.«**

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

# Inhalt

---

|                                                                                     |                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|    | Hocheffiziente und stabile Perowskit-Solarzellen mit Graphitelektroden                            | 58 |
|                                                                                     | Großflächige Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen                                                 | 59 |
|                                                                                     | Kalibrierung von Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen und -modulen                                | 60 |
|                                                                                     | TOPCon-Strukturen für den Einsatz in Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen                         | 61 |
|                                                                                     | KI-gestütztes Design von hocheffizienten Laserleistungszellen für die Telekommunikation           | 62 |
|   | Entwicklung höchsteffizienter III-V-Mehrfachsolarzellen für die Konzentrator-Photovoltaik         | 63 |
|  | Epitaktisch gewachsene Si-Wafer für höchsteffiziente Solarzellen                                  | 64 |
|  | FlexTrail-Feinliniendruck für hocheffiziente Solarzellen mit ressourcenschonendem Materialeinsatz | 65 |
|                                                                                     | »On-the-fly«-Laserprozessierung mit hohem Durchsatz                                               | 66 |
|                                                                                     | Kontaktlose Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie von Siliciumsolarzellen                         | 67 |
|  | Widerstandsfähigere Materiallieferketten durch Risikoanalyse                                      | 68 |
|                                                                                     | p-Typ Si-Solarzellen mit ladungsträgerselektivem Halbleiterübergang und passivierten Kontakten    | 69 |
|                                                                                     | Erfolgreiche Industrialisierung der Matrix-Schindeltechnologie                                    | 70 |
|  | Automatisierte Fehlererkennung und optimierte Betriebsführung für PV-Kraftwerke                   | 71 |
|  | Potenzialerschließung der Agri-Photovoltaik in Baden-Württemberg                                  | 72 |
|                                                                                     | Prüfmethoden für integrierte PV-Anwendungen am Beispiel der fahrzeugintegrierten Photovoltaik     | 73 |
|                                                                                     | Farbige Abdeckscheiben für solarthermische Kollektoren                                            | 74 |



**Themen, die auf unsere Arbeit im Kontext der Energiewende und der Nachhaltigkeit besonderen Einfluss haben, sind mit diesem Symbol markiert.**

|                                                                                     |                                                                                                                  |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|    | integraTE – innovative Systemlösungen für die Raumheizung und -kühlung .....                                     | 75 |
|    | LC150 – Propan-Kältekreise mit deutlich reduzierten Füllmengen .....                                             | 76 |
|                                                                                     | Automatisierte Generierung von digitalen Anlagenschemata .....                                                   | 77 |
|                                                                                     | Mit einer Luftwand zu mehr Effizienz – Reduktion konvektiver Verluste in solarthermischen Kraftwerken .....      | 78 |
|    | Hochtemperatur-Wärmepumpen für die Industrie .....                                                               | 79 |
|                                                                                     | Leistungselektronik für stationäre Batteriespeichersysteme mit bis zu 1 500 V Eingangsspannung .....             | 80 |
|  | Felddaten- und Ausfallanalyse für eine höhere Zuverlässigkeit von PV-Wechselrichtern .....                       | 81 |
|  | Transformationspfade für die Energiewende unter veränderten Rahmenbedingungen .....                              | 82 |
|                                                                                     | Bidirektionales Laden – volles Potenzial der Elektromobilität entfalten .....                                    | 83 |
|  | Leistung und Alterung der Membranelektrodeneneinheit von mobilen Brennstoffzellen .....                          | 84 |
|  | Synthetische Kraftstoffe für eine nachhaltige Mobilität – die $\pi$ -COMET®-Technologie des Fraunhofer ISE ..... | 85 |
|                                                                                     | Fortschrittliche Zellkonzepte für die großskalige Massenproduktion von PEM-Elektrolyseuren .....                 | 86 |
|                                                                                     | Sicherheitsuntersuchungen für Batterien und Entwicklung von Lösungen gegen das thermische Durchgehen .....       | 87 |
|  | Mehr Nachhaltigkeit für Batteriezellen und -konzepte entlang der gesamten Wertschöpfungskette .....              | 88 |
|  | Integration von Großspeichern in Energiesysteme .....                                                            | 89 |



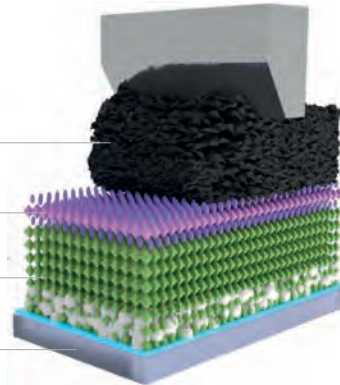
## Hocheffiziente und stabile Perowskit-Solarzellen mit Graphitelektroden

Rakelbeschichtete kohlenstoffbasierte Elektrode

2D-Perowskit

3D-Perowskit

Transparente Frontelektrode



*Illustration von Perowskit-Solarzellen mit blattbeschichteten Elektroden auf Kohlenstoffbasis, die eine elektronenblockierende 2D-Perowskit-Schicht aufweisen.*

Die Perowskit-Photovoltaik scheint zwar kurz vor der Kommerzialisierung zu stehen, doch ihre vergleichsweise geringe Langzeitstabilität verhindert bisher, dass sie sich auf dem PV-Markt etabliert. Ein Teil des Stabilitätsproblems lässt sich auf die metallbasierte Rückelektrode zurückführen, die die Solarzelle unter verschiedenen Stressbedingungen (z. B. Licht, Temperatur, Feuchtigkeit) irreversibel degradiert und somit einen Leistungsverlust verursacht. Um dieses Problem zu vermeiden, können chemisch inerte und hydrophobe Elektroden auf Kohlenstoffbasis verwendet werden, die eine längere Lebensdauer des Bauteils ermöglichen. Allerdings ist die Leistung von Solarzellen mit Kohlenstoffelektroden in der Regel geringer als die von Standardzellen mit Metallelektroden. Dies liegt zum Großteil an der geringeren Leitfähigkeit der kohlenstoffbasierten Materialien sowie dem schlechteren Kontakt zu den darunterliegenden Schichten, der zusätzliche Leistungsverluste verursacht.

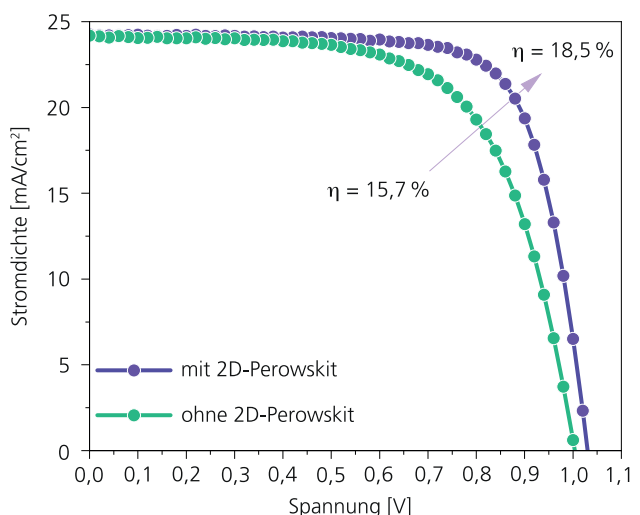
Das Fraunhofer ISE konnte zeigen, dass diese Zellen typischerweise unter erhöhten Rekombinationsverlusten an der Grenzfläche zwischen Kohlenstoffelektrode und Perowskit leiden. Um dieses Problem zu lösen, haben wir gemeinsam mit der École polytechnique fédérale de Lausanne (EPFL) ein zweidimensionales Material auf Perowskit-Basis entwickelt, das als Elektronensperrschicht fungiert und die ungewollte Diffusion von Elektronen zur Kohlenstoffelektrode effektiv unterdrückt. Gleichzeitig ermöglicht eine günstige Lage der Energiebänder eine effiziente Extraktion von Löchern, was zu hervorragenden optoelektronischen Eigenschaften und einem Solarzellen-Wirkungsgrad von 18,5 % führt. Darüber hinaus wurden die kohlenstoffbasierten Elektroden durch Blade-Coating abgeschieden – eine hochskalierbare Technik, die nicht nur für die Herstellung von Solarzellen im Labormaßstab, sondern auch für großflächige PV-Module geeignet ist. Die einzigartige Kombination aus hohem Wirkungsgrad, Langzeitstabilität und Skalierbarkeit zeigt, dass Perowskit-Solarzellen und -Module mit kohlenstoffbasierten Elektroden das Potenzial haben, einen nachhaltigen Beitrag zur nächsten Generation der PV-Technologie zu leisten. Diese vielversprechenden Ergebnisse wurden kürzlich in der renommierten [Fachzeitschrift Advanced Energy Materials](#) veröffentlicht. Sie entstanden im Rahmen des europäischen Forschungsprojekts »UNIQUE«, das auf die Entwicklung stabiler, effizienter und hochskalierbarer Perowskit-PV mit kohlenstoffbasierten Elektroden abzielt.

Die Forschenden am Fraunhofer ISE arbeiten aktiv mit Industriepartnern in ganz Europa zusammen, um stabile und effiziente, großflächige Perowskit-Solarmodule herzustellen. Wie sie bereits gezeigt haben, können diese Module auch anspruchsvollste [Stabilitätstests](#) bestehen, was die hervorragenden Aussichten für diese Bauteile im Hinblick auf eine nachhaltige und langfristige Energieerzeugung unterstreicht.

### Kontakt

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

*Stromdichte-Spannungs-Kurven von Solarzellen mit und ohne 2D-Perowskit-Schicht, deren Wirkungsgrad ( $\eta$ ) sich stark unterscheidet.*



# Großflächige Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen

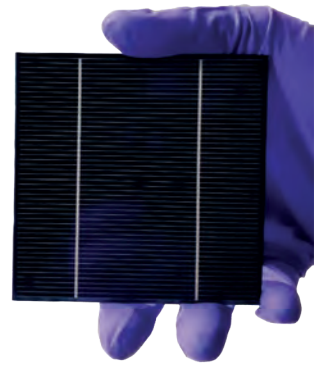
Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen stellen eine Weiterentwicklung der etablierten siliciumwaferbasierten Standardtechnologie dar. Hierbei wird eine Perowskitsolarzelle mit großer Bandlücke auf die Siliciumsolarzelle prozessiert, um so das Sonnenlicht besser auszunutzen. Im Labormaßstab liegt der derzeit publizierte Wirkungsgrad bei 31,3 %, was das Potenzial dieser Technologie bereits andeutet. Allerdings sind die Flächen der Laborzellen noch klein (ca. 1 cm<sup>2</sup>) und nicht alle bisher im Labor erprobten Methoden sind für die industrielle Fertigung skalierbar.

Neben der kontinuierlichen Weiterentwicklung der Materialsysteme auf kleinen Flächen entwickelt das Fraunhofer ISE Technologien für die industrielle Massenfertigung. Im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »PrEsto« steht dabei das sogenannte Hybridverfahren im Fokus. In einem ersten Schritt dampfen wir die anorganischen Komponenten auf die Untersolarzelle auf. Im darauffolgenden Schritt bringen wir unter Verwendung von Sprühverfahren, Inkjets oder einer Schlitzdüse organische Salze auf. Der Vorteil ist, dass so auch texturierte Siliciumsolarzellen konformal beschichtet werden können. Diese pyramidenförmig strukturierte Oberfläche ist nicht nur der Standard industriell hergestellter Siliciumsolarzellen, sondern hat auch positiven Einfluss auf den erreichbaren Wirkungsgrad und den erwartbaren Jahresenergieertrag bei der Anwendung im Feld.

Im Projekt »PrEsto« evaluieren wir verschiedene Herstellungsverfahren für Perowskit-Obersolarzellen. Diese sind für eine großflächige Beschichtung der bereits industriell hergestellten Silicium-Untersolarzelle geeignet und für die Massenfertigung skalierbar. Wir forschen zusammen mit unseren Partnern an Anpassungen der Materialsysteme und technischen Randbedingungen bei der Herstellung.

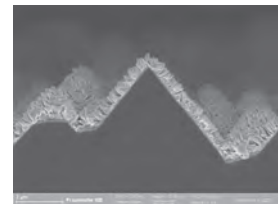
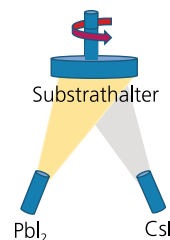
Das Fraunhofer-Leitprojekt »MaNiTU« flankiert diese Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Hier stehen Hocheffizienz und die Entwicklung nachhaltiger Materialien für die Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellenanwendung im Fokus. Mit dem klassischen Rotationsabscheideverfahren auf planaren Oberflächen haben wir bereits Spitzenwirkungsgrade von 26,8 % auf kleinen Flächen (0,25 cm<sup>2</sup>) und 22,5 % auf großer Fläche (104 cm<sup>2</sup>) erreicht und im Callab PV Cells zertifiziert. Neueste Tandemergebnisse von 28 % (0,25 cm<sup>2</sup>) konnten kürzlich durch Optimierung des Vorderseitenkontaktes erzielt werden. Sie stellen einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zu 30 % und mehr Tandemwirkungsgrad dar.

*104 cm<sup>2</sup> großflächige Perowskit-Silicium-Tandemsolarzelle mit siebgedruckter Vorderseitenmetallisierung und einem zertifiziertem Wirkungsgrad von 22,5 %.*



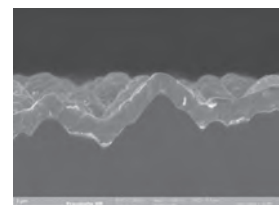
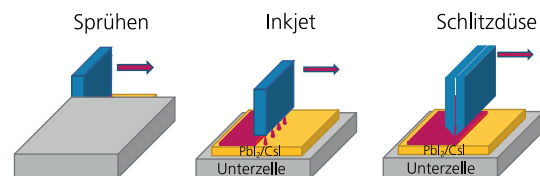
## Schritt 1

Thermische Verdampfung von PbI<sub>2</sub> und CsI.



## Schritt 2

Infiltrieren der organischen Matrix mit organischen Salzen mittels Sprühen, Inkjet oder Schlitzdüse.

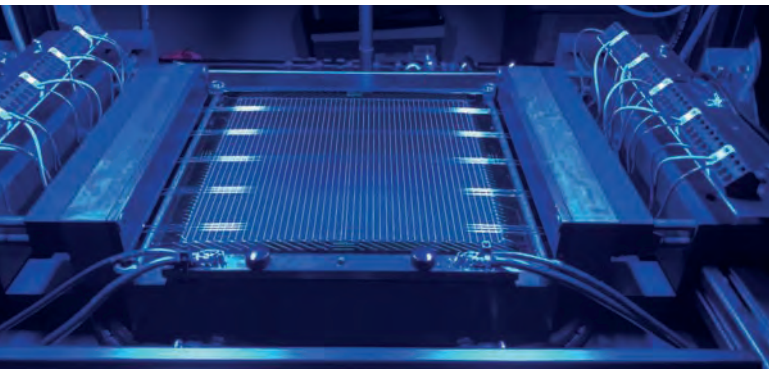


*Durch Verwendung des zweistufigen Hybridverfahrens können auch texturierte Silicium-Untersolarzellen konformal mit einer Perowskit-Obersolarzelle beschichtet werden.*

## Kontakt

Dr. Oliver Schultz-Wittmann  
Telefon +49 761 4588-5922  
tandempv.pero-silicon@ise.fraunhofer.de

## Kalibrierung von Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen und -modulen



*Eine homogene BIAS-Beleuchtung (hier blau für die Perowskit-Topzelle) ermöglicht eine präzise Bestimmung der globalen Quanteneffizienz von Teilzellen.*

Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen zeigen eine bemerkenswerte Entwicklung hin zu höheren Wirkungsgraden, verbesserten Stabilitätseigenschaften und industriell umsetzbaren Prozessen. Zur zukünftigen großtechnischen Etablierung dieser Technologie ist eine unabhängige und verlässliche, zertifizierte Bestimmung der Wirkungsgrade notwendig, um objektive Vergleiche verschiedener Prozessrouten sowie deren wirtschaftliche Bewertung zu ermöglichen.

Durch die direkte Herstellung eines monolithischen Tandemverbunds sind die beiden Teilzellen nicht mehr ohne Weiteres einzeln zugänglich. Weil bei falscher Wahl des Messspektrums schon kleine Unterschiede in den Quanteneffizienzen der Teilzellen signifikante Abweichungen der Zellparameter erzeugen können, ist eine spektral einstellbare Anregungsbeleuchtung unabdingbar. Im Gegensatz zur Messung von III-V-basierten Tandemzellen müssen größere Zellflächen und spezifische Metastabilitäten berücksichtigt werden, was eine Anregung unter Dauerlicht und angepasste Messroutinen erforderlich macht.

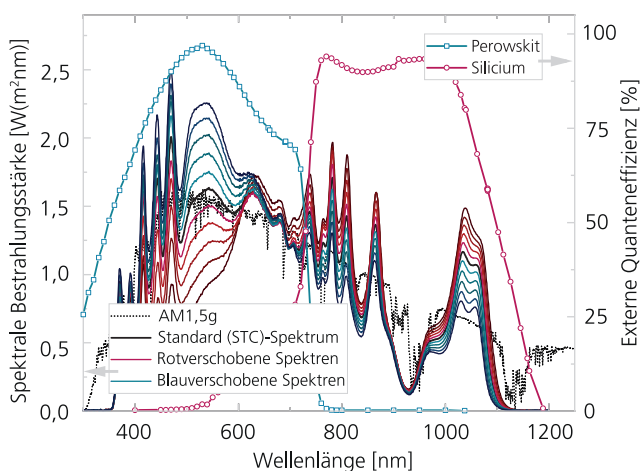
### Kontakt

Dr. Martin Schubert  
Telefon +49 761 4588-5660  
cells@callab.de

*Variation von Einstrahlungsspektren für die spektrometrische Charakterisierung einer durch die Quanteneffizienz der Ober- (blau) und Unterzelle (rot) dargestellten Tandemsolarzelle.*

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Forschungsprojekts »KATANA« arbeitet das Fraunhofer ISE an Methoden, um mit präzise einstellbaren Anregungsspektren Zell- und Modulparameter dieses neuen Solarzellentyps unter Dauerlicht zu kalibrieren. Das Fraunhofer Callab PV Cells entwickelte geeignete Verfahren zur kalibrierten Messung der globalen Quanteneffizienz (Abb. links) und der Stromspannungsparameter. So konnten wir Rekordwirkungsgrade für 6" große Tandemzellen kalibriert messen und darüber in den [»Solar Cell Efficiency Tables«](#) berichten. Weiterführende Spektralmetrikanalysen geben detaillierte Einsicht in Stromlimitierungen der Teilzellen und ermöglichen ein verbessertes Verständnis für die Zellentwicklung.

Wir arbeiten kontinuierlich daran, unsere Messunsicherheiten weiter zu reduzieren und auf Basis der Messprozeduren für Tandemsolarzellen entsprechende Kalibrierprozeduren für Tandemmodule im Callab PV Modules zu entwickeln. Eine zusätzliche Herausforderung ist dabei die Kontrolle der Homogenität des großflächigen Dauerlichtanregungsspektrums, welches z. B. durch leistungsstarke LED-Arrays mit einer Vielzahl verschiedener Wellenlängen realisiert werden kann. Zum Umgang mit metastabilem Verhalten entwickeln wir Vorkonditionierungsprozeduren, um das Modul für die Messung in einen reproduzierbaren Zustand zu bringen. Die langen Messzeiten unter Dauerlicht erfordern eine präzise thermische Kontrolle des Moduls, um zusätzliche Beiträge zur Messunsicherheit zu minimieren. Die Berücksichtigung von mono- sowie bifazialer Zellarchitektur ist dabei von großer Bedeutung.

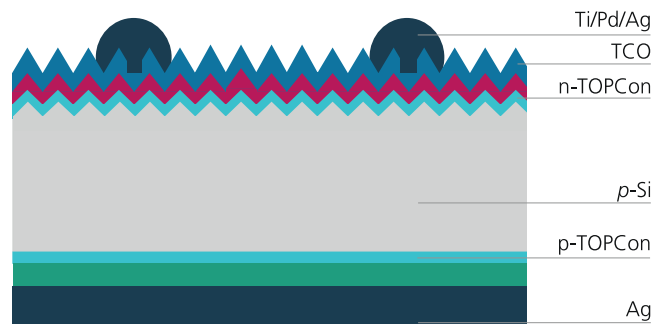


# TOPCon-Strukturen für den Einsatz in Perowskit-Silicium-Tandemsolarzellen

Kristalline Siliciumsolarzellen dominieren seit Jahrzehnten den globalen Photovoltaikmarkt. Evolutionäre Weiterentwicklungen ermöglichen dabei eine jährliche Steigerung des Wirkungsgrades von ca. 0,5 %<sub>abs.</sub>. Allerdings limitieren Rekombinationsverluste an den Metall-Halbleiter-Grenzflächen den Wirkungsgrad der industriell dominierenden PERC-Technologie. Die am Fraunhofer ISE entwickelte und inzwischen weit verbreitete TOPCon-Technologie (Tunnel Oxide Passivated Contact) umgeht dieses Problem durch passivierende und ladungsträgerselektive Kontakte. Dabei wird die Erzeugung von Elektron-Loch-Paaren im Siliciumabsorber und deren Separation an den Elektroden räumlich voneinander getrennt. Mit dieser fortgeschrittenen Technologie konnten wir einen Rekordwirkungsgrad von 26,0 % für p-Typ Solarzellen erreichen.

Jedes Solarzellenmaterial hat jedoch auch ein klares physikalisches Wirkungsgradlimit, das im Fall von Silicium (Si) bei 29,4 % liegt. Durch die Verwendung von Tandemsolarzellen, beispielsweise mit einer Silicium-Unterzelle und einer Perowskit-Topzelle, lässt sich das Wirkungsgradpotenzial deutlich erhöhen. Auch bei der Entwicklung einer hocheffizienten und kostengünstigen Silicium-Unterzelle stehen am Fraunhofer ISE passivierende Kontakte im Fokus. Besonders von der TOPCon<sup>2</sup>-Zelle mit vollflächigen passivierenden TOPCon-Kontakten auf Vorder- und Rückseite erwarten wir uns ein sehr hohes Effizienzpotenzial und eine hohe Wirtschaftlichkeit. Während der n-dotierte TOPCon-Kontakt eine exzellente Passivierung auf planen und texturierten Oberflächen erreicht ( $J_0 = 1 \text{ fA/cm}^2$ ), konnte bisher für den p-dotierten TOPCon-Kontakt noch nicht das gesamte Potenzial ausgeschöpft werden.

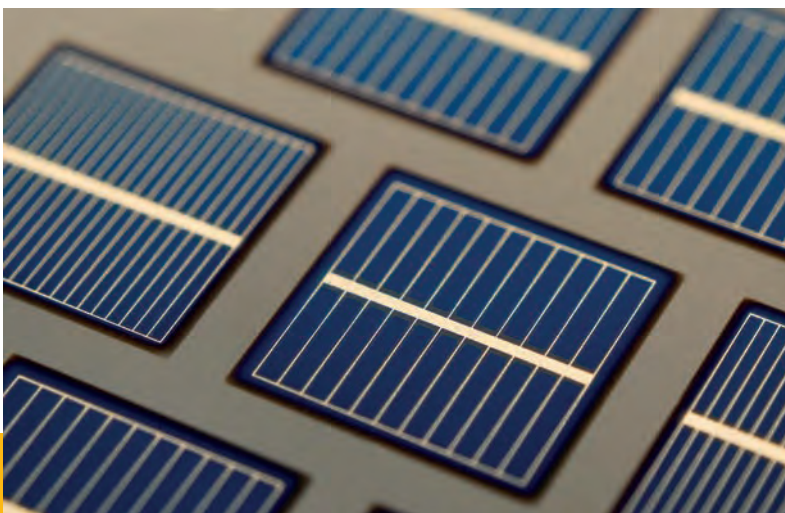
Am Fraunhofer ISE laufen daher umfangreiche Arbeiten, um ein grundlegendes Verständnis von der Funktion sowie den



Struktur der p-Typ Solarzelle mit n-TOPCon auf der Vorderseite und p-TOPCon auf der Rückseite.

Limitierungen dieses Kontakts zu erlangen. Wir konnten zeigen, dass das Zusammenspiel aus der Stöchiometrie des ultradünnen Grenzflächenoxids und des Hochtemperaturschritts sowie eine effektive Wasserstoffpassivierung eine entscheidende Rolle spielen. Basierend auf diesen Untersuchungen ist es nun gelungen, die Passivierung des p-dotierten TOPCon-Kontakts entscheidend zu verbessern. So konnten Sättigungsstromdichten  $J_0$  von 7 fA/cm<sup>2</sup> auf planen, und 17 fA/cm<sup>2</sup> auf texturierten Oberflächen erreicht werden. Gleichzeitig konnten wir sehr gute Kontakteigenschaften mit einem Kontaktwiderstand  $\rho_c = 5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$  erzielen. Die n- und p-dotierten TOPCon-Kontakte haben wir in TOPCon<sup>2</sup>-Solarzellen integriert, um ihre Eignung als Unterzelle zu prüfen, wobei besonders die Leerlaufspannungen ( $V_{oc}$ ) und Füllfaktoren (FF) die wesentlichen Bewertungsparameter darstellen. Die TOPCon<sup>2</sup>-Solarzellen zeigen sehr gute  $V_{oc}$ -Werte bis ca. 720 mV und FF bis 81 %. Damit stellt diese Zelle einen sehr vielversprechenden Kandidaten für eine Bottomzelle in einer monolithischen Perowskit-Silicium-Tandemsolarzelle dar.

Vorderseite von 2x2 cm<sup>2</sup> großen TOPCon-Solarzellen.

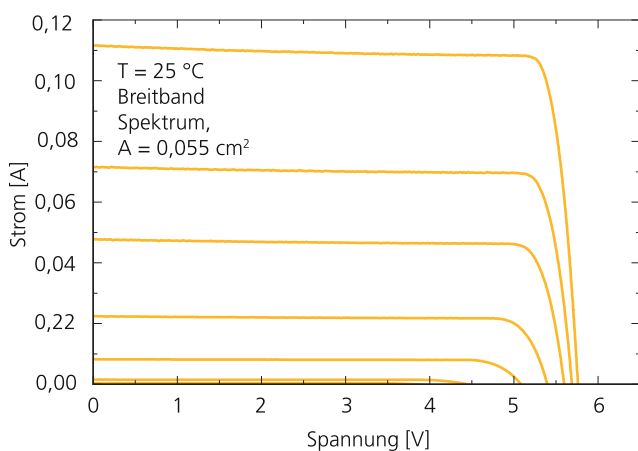


## Kontakt

Dr. Jana-Isabelle Polzin  
Telefon +49 761 4588-5921  
tandempv.pero-silicon@ise.fraunhofer.de

## KI-gestütztes Design von hocheffizienten Laserleistungszellen für die Telekommunikation

Photonik und Optoelektronik sind Schlüsseltechnologien für die Digitalisierung. Das Design entsprechender Halbleiterbauelemente sowie die Modellierung von Epitaxieprozessen, die zu deren Herstellung erforderlich sind, kann im Rahmen von Industrie 4.0 wesentlich von Methoden der künstlichen Intelligenz (KI) profitieren. Die allgegenwärtige Digitalisierung und Automatisierung sowie das Internet der Dinge erfordern konstante Energie- und Datenströme. Die aufkommende Technologie der photonischen Leistungsübertragung – auch bekannt als »Power-by-Light« – ermöglicht, Energie- und Datentransfer in einer einzigen optischen Verbindung zu kombinieren und so einen elektrisch isolierten, störungsfreien Betrieb sicherzustellen. Durch die Verwendung von optischen Telekommunikationswellenlängen können die Anwendungsmöglichkeiten solcher »Power-by-Light«-Systeme auf entfernte Standorte erweitert werden und erlauben eine unbegrenzte Energieversorgung aus der Ferne.



*Stromspannungscharakteristik der 10-fach InGaAs-PPCs unter Breitbandbeleuchtung bei verschiedenen Bestrahlungsstärken.*

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Verbundprojekt »AIR-Power« arbeiten wir gemeinsam mit unseren deutschen und kanadischen Partnern an KI-gestützten Ansätzen für das Design und die Fertigung von photonischen Leistungswandlern (engl. Photonic Power Converter, PPC) im Bereich der Telekommunikationswellenlängen um 1,5  $\mu\text{m}$ . Am Fraunhofer ISE werden im Rahmen des Projekts innovative PPC-Photovoltaikzellen auf Basis des III-V-Halbleitermaterials InGaAs(P) entwickelt. Dieses stellt für diesen Wellenlängenbereich ein optimales Absorbermaterial dar.

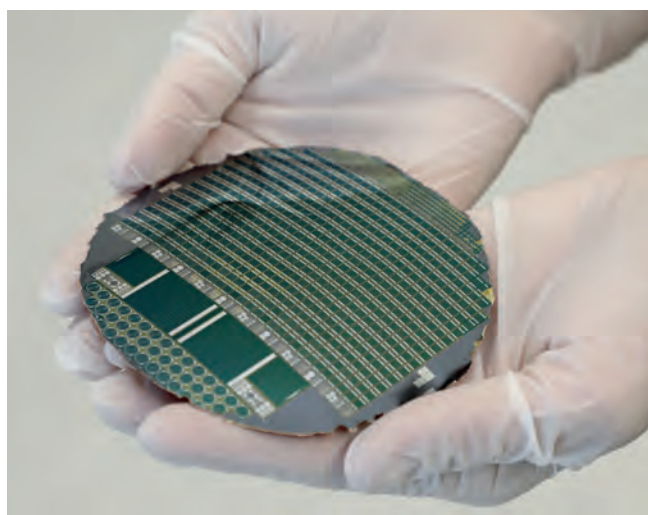
Es ist uns gelungen, erstmalig eine InGaAs-Mehrfachzelle zu realisieren, die aus zehn vertikal gestapelten Teilzellen besteht. Diese sind mittels transparenter Tunneliodenschichten seriell miteinander verschaltet. Durch die präzise Fertigung der Teilzellendicken können wir eine Stromanpassung der seriell verschalteten Teilzellen sicherstellen. Durch ein neu entwickeltes Messverfahren sind wir zudem in der Lage, die Teilzellströme unter verschiedenen Bedingungen messtechnisch zu erfassen. Erste Messungen der Strom-Spannungs-Charakteristik der Zehnfachzelle unter Beleuchtung zeigen Ausgangsspannungen über 5 V (Grafik). Dadurch kann in der Anwendung eine verlustbehaftete Hochkonversion der Spannung vermieden werden.

Weiterhin entwickeln wir eine Dünnschichtprozessestechnologie für InP-basierte Halbleiterbauelemente. Dazu passen wir unsere zuvor für GaAs-basierte Bauelemente entwickelte Dünnschichttechnologie an. Für den Einsatz der Bauelemente spielen auch Herstellungskosten eine wichtige Rolle. Insbesondere für InP-basierte Bauelemente machen die Substratkosten einen signifikanten Kostenanteil aus. Um diese zu reduzieren, entwickeln wir sogenannte Engineered Substrates, bei welchen eine metamorphe InP-Schicht auf einem viel kostengünstigeren GaAs-Substrat aufgebracht wird. Hiervon versprechen wir uns Vorteile bei der Umsetzung der Technologie in industrielle Produkte.

### Kontakt

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

*Flexibler 4-Zoll-Wafer mit InGaAs-PPCs, gefertigt in Dünnschichttechnologie.*



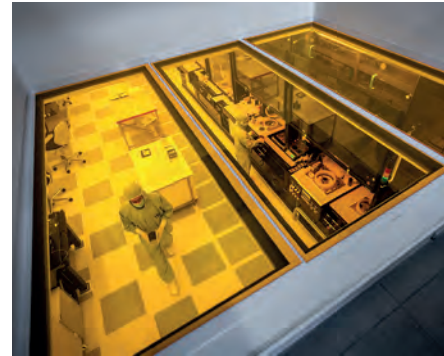
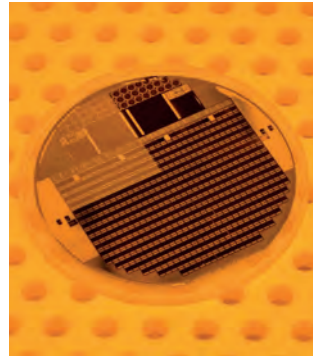


## Entwicklung höchsteffizienter III-V-Mehrfach-solarzellen für die Konzentrator-Photovoltaik

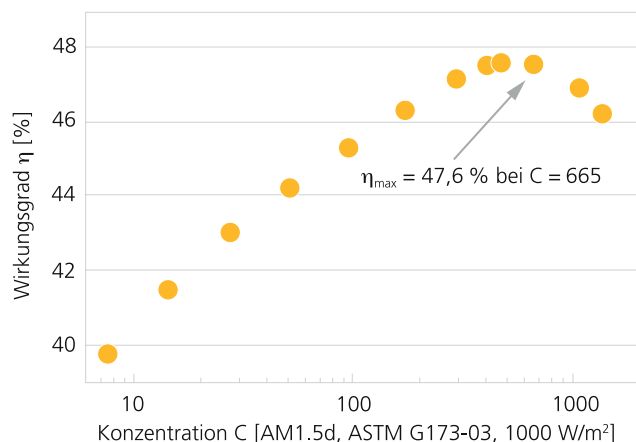
In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »50Prozent« entwickelt das Fraunhofer ISE höchsteffiziente Mehrfach-solarzellen aus III-V-Verbindungshalbleitern für die Anwendung unter konzentriertem Sonnenlicht. Dabei soll erstmals ein Wirkungsgrad von 50 % demonstriert werden. Dieses ambitionierte Ziel lässt sich theoretisch mit einer Solarzelle realisieren, die aus vier oder mehr Teilzellen besteht. Allerdings müssen dazu alle Materialien und Prozesse optimal aufeinander abgestimmt sein.

Basierend auf theoretischen Rechnungen entwickeln wir Epitaxieprozesse für III-V-Kristalle weiter und optimieren zeitgleich die Prozesskette für Metallkontakte und Antireflexions-schichten. Selbst die elektrische Charakterisierung muss für Sechsfach-solarzellen neu entwickelt werden, um international anerkannten Standards an Messfehler genügen zu können. Im Jahr 2022 ist uns mit der Demonstration der weltweit ersten Solarzelle mit einem Wirkungsgrad von 47,6 % ein wichtiger Meilenstein gelungen (Grafik). Dieser Wert wurde bei einer 665-fachen Konzentration des AM1,5d-Spektrums gemessen, also bei einer eingestrahlichten Leistungsdichte von 66,5 W/cm<sup>2</sup>. Die Solarzellen sind speziell für diese hohen Lichtintensitäten ausgelegt und weisen entsprechend niederohmige Kontakt-finger auf. Diese werden im Reinraum des neuen Zentrums für höchsteffiziente Solarzellen (Abb. oben) entwickelt. Hier verfügen wir über eine exzellente Infrastruktur für die Halbleiter-prozessierung und können so verschattungsarme Metallfinger mit einer Breite von nur wenigen Mikrometern realisieren.

In neuesten Entwicklungen versuchen wir sogar, die Metall-finger gänzlich unter einem dreieckigen reflektierenden Mantel zu verstecken. Kombiniert mit einer vierlagigen HERPIN-Anti-reflexionsbeschichtung planen wir hierdurch die parasitäre Reflexion von Licht weitgehend zu unterdrücken. Die bisher realisierten Vierfach-solarzellen weisen III-V-Halbleiterschichten aus GaInP, AlGaAs, GaInAsP und GaInAs auf, die das Sonnenlicht zwischen 350 nm bis 1750 nm absorbieren. Die oberen beiden Teilzellen werden auf GaAs-Substrat gewachsen, die unteren auf InP. Verbunden werden die Zellen über einen sogenannten direkten Halbleiterbond. Nur mit diesem komplexen Herstellungsverfahren können wir heute die herausragende Materialqualität erreichen, die für Weltrekordwirkungsgrade erforderlich ist. In einem nächsten Schritt werden wir zwei weitere Teilzellen in die Struktur einbringen, was nochmals ein höheres theoretisches Potenzial erbringt.



Die Konzentratorsolarzellen (links) werden auf Wafern mit einem Durchmesser von 100 mm im neuen Reinraum des Zentrums für höchsteffiziente Solarzellen (rechts) gefertigt.



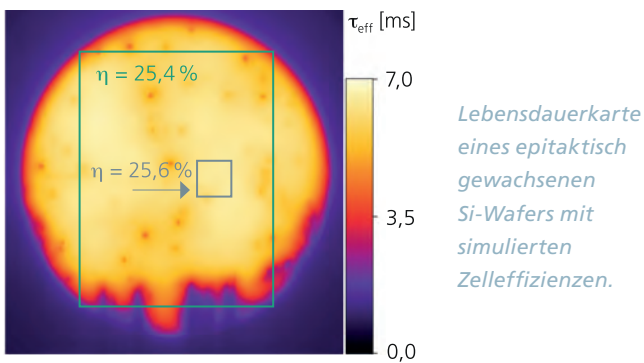
2022 konnte mit einer wafergebondeten Vierfach-solarzelle ein neuer Effizienzweltrekord von 47,6 % bei 665-facher Konzentration des Sonnenlichts erreicht werden.

### Kontakt

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



## Epitaktisch gewachsene Si-Wafer für höchsteffiziente Solarzellen



Mit zunehmendem Ausbau der Photovoltaik spielen Kostenaspekte bei der PV-Produktion eine immer größere Rolle. Eine ressourcenschonende und kostensparende Alternative zum herkömmlichen Si-Wafer stellt der epitaktisch gewachsene Si-Wafer (EpiWafer) dar. Das Silicium wird hierbei direkt aus der Gasphase auf einem Template gewachsen. Dabei überspringt man die energieintensiven und verlustreichen Prozessschritte, die beim herkömmlichen Si-Wafer zwischen Gasphasenabscheidung und fertigem Wafer liegen: Abscheiden von polykristallinem Silicium (poly-Si), Aufschmelzen des poly-Si, Ziehen des Ingots, Wafering. Natürlich bringt diese verkürzte Prozessroute neue Herausforderungen mit sich: die Qualität des Templates, eine kostengünstige und hochwertige Si-Epitaxie sowie die Ausbeute beim Ablöseprozess des EpiWafers vom Template.

Am Fraunhofer ISE haben wir einen Prozess etabliert, der es ermöglicht, die Eigenschaften von Template und Ablöseprozess von denen der Si-Epitaxie zu trennen. Dies ermöglicht Potenzialanalysen an höchstmöglichen Materialqualitäten sowie Untersuchungen von neuen Solarzellenkonzepten.

Dazu verwenden wir chemisch-mechanisch polierte Si-Wafer als Template. Die Si-Epitaxie erfolgt in einem hochreinen Mikroelektronik-Epitaxie-Reaktor (Abb. unten). Danach wird das Template in einem Schleifprozess entfernt und die freistehende Si-Epitaxieschicht auf ihre kristallographische und elektrische Qualität hin untersucht. Im vergangenen Jahr konnten wir eine ausgezeichnete kristallographische Qualität (Stapelfehlerdichte  $< 1/\text{cm}^2$ , Versetzungsdichte  $< 100/\text{cm}^2$ ) und sehr hohe Ladungsträgerlebensdauern  $\tau$  zeigen (z. B.  $\tau = 9,7$  ms auf  $100 \text{ } \Omega\text{cm}$  p-dotiertem Material).

Ein weiterer von uns erfolgreich getesteter Prozess ist das Wachsen von p/n-Übergängen. Die Verwendung dieser EpiWafer<sup>p/n</sup> vereinfacht den Solarzellenprozess, da keine Emitterdiffusion nötig ist, und ermöglicht die Realisierung von optimierten Dotierprofilen, die bei einer herkömmlichen Diffusion nicht möglich sind.

Um aus der Vielzahl der möglichen Waferdotierungen diejenigen zu bestimmen, die die höchste Zelleffizienz versprechen, haben wir zahlreiche Zellsimulationen durchgeführt. Vielversprechende Kandidaten sind die TOPCoRE-Zellen und p-dotierte Si-Wafer mit niedriger Basisdotierung. Die Abb. links zeigt die Lebensdauerkarte eines epitaktisch gewachsenen Si-Wafers mit einem Basiswiderstand von  $100 \text{ } \Omega\text{cm}$ . Die Simulation für den grünen, großflächigen Bereich ( $6 \times 8 \text{ cm}^2$ ) verspricht eine Zelleffizienz von 25,4 %, die für den blauen, besten Bereich ( $1 \times 1 \text{ cm}^2$ ) eine Zelleffizienz von 25,6 %.

Mit unserer Si-Epitaxie-Referenzroute konnten wir dem Start-up NexWafe einen zuverlässigen Baseline-Prozess anbieten. Das Unternehmen hat sich das Up-Scaling der EpiWafer-Technologie zum Ziel gesetzt und nutzt unsere Referenzepitaxie zur Qualifizierung aller Einzelschritte ihrer EpiWafer-Prozesskette.

### Kontakt

Dr. Charlotte Weiss  
Telefon +49 761 4588-5591  
sipv-csi-thinfilmm@ise.fraunhofer.de

*Waferhandling am  
Si-Epitaxie-Reaktor.*





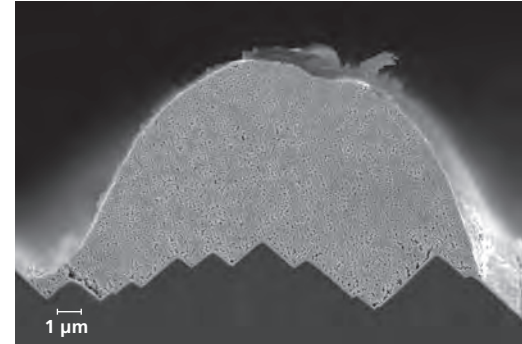
## FlexTrail-Feinliniendruck für hocheffiziente Solarzellen mit ressourcenschonendem Materialeinsatz

Das am Fraunhofer ISE entwickelte FlexTrail-Druckverfahren ist für den (Feinlinien-)Druck einer Vielzahl von Fluiden geeignet. Diese umfassen partikelbasierte Metallfluide, ätzende und pyrophore Medien sowie Farbtinten, Polymere und Keramik. Gegenüber anderen Druckverfahren zeichnet sich FlexTrail durch eine hohe Toleranz in Bezug auf die Rheologie der Druckmedien – insbesondere die Viskosität betreffend – aus. Das bedeutet, dass sowohl niederviskose Tinten, z. B. für Inkjet-Druck, als auch hochviskose Pasten, z. B. für Siebdruck, mit Strukturbreiten von 10 µm und weniger auf planare und texturierte Substrate appliziert werden können.

Im von der EU geförderten Projekt »Bussard« untersuchen wir am Fraunhofer ISE FlexTrail als Direktmetallisierungsverfahren für den Druck von nanosilberbasierten Vorderseitenmetallkontakten für Silicium-Heterojunction-Solarzellen (SHJ). Der FlexTrail-Druck erlaubt die Herstellung von Metallkontakten in einem Druckschritt, deren Geometrie in der Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme (oben) zu sehen ist. Die mittlere abschattende Fingerbreite dieser Metallkontakte beträgt  $(12,7 \pm 0,4) \mu\text{m}$  und die mittlere Höhe  $(6,4 \pm 0,4) \mu\text{m}$ . Der Quotient aus beiden Werten ergibt das Aspektverhältnis von 0,5.

Der FlexTrail-Druck ermöglicht somit einen sehr geringen Silberverbrauch von nur  $(9,4 \pm 0,9) \text{ mg}$  für ein Vorderseitenkontaktgitter ohne Busbars, das 80 Kontaktfinger mit einer Länge von 156 mm umfasst. Dies bedeutet eine Silbereinsparung von mehr als 60 % verglichen mit der siebgedruckten Referenz. Dabei erreichen SHJ-Solarzellen im Format M2+ mit FlexTrail-gedruckten Vorderseitenkontakten Wirkungsgrade von bis zu  $(22,87 \pm 0,01) \%$ . Dieser Wert ist ähnlich zu jenen Werten, die mit siebgedruckten Referenzzellen erreicht werden.

*Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines Nanosilber-Kontaktfin-  
gers mit einem Aspekt-  
verhältnis von 0,5.*



Um den Entwicklungsgrad von FlexTrail-Kontakten zu demonstrieren, haben wir SHJ-Solarzellen mit FlexTrail-Kontakten zu kleinformatigen, monofazialen Modulen der Größe 200 mm x 200 mm weiterverarbeitet. Dazu wurde ein industrieller Multi-Wire-Verschaltungsansatz genutzt. Die Module erreichen eine maximale Leistung von  $(5,0 \pm 0,1) \text{ W}$ . Dies entspricht etwa dem Industriestandard und verdeutlicht das große Potenzial des FlexTrail-Drucks für die Metallisierung von hocheffizienten Solarzellen mit niedrigem Ressourcenverbrauch.

Bislang realisieren wir den FlexTrail-Druck mit einem flexibel anwendbaren Druckkopf mit einer Kapillare, den wir in verschiedene labortypische Anlagenumgebungen, u. a. auch in eine Glovebox, integriert haben. Die Abbildung unten zeigt die Fotografie einer einzelnen Kapillare, aufgenommen während des Drucks. Derzeit wird ein Paralleldruckkopf entwickelt, der für die Metallisierung von hocheffizienten (Tandem-)Solarzellen mit hohem Durchsatz genutzt werden kann, aber auch für andere Anwendungen – beispielsweise im Bereich der gedruckten Elektronik – relevant sein wird.

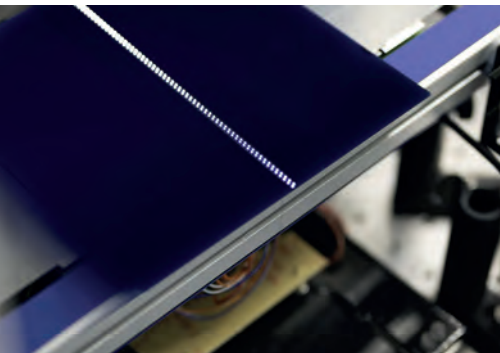


*FlexTrail-Druck eines Kontaktgitters auf eine Silicium-Heterojunction-Solarzelle mit einem Druckkopf, der eine einzelne Kapillare besitzt.*

### Kontakt

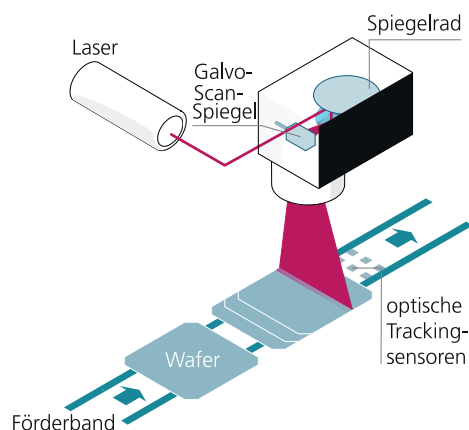
Dr. Roman Keding  
Telefon +49 761 4588-5827  
sipv.contact@ise.fraunhofer.de

## »On-the-fly«-Laserprozessierung mit hohem Durchsatz



*Der Laser erzeugt mehrere Millionen Kontaktöffnungen pro Sekunde, während der Wafer kontinuierlich auf einem Förderband bewegt wird.*

Die Produktionskapazitäten von Solarzellen haben in den letzten Jahren rasant zugenommen. Während die Laserprozessstechnologie aus der Solarzellerfertigung nicht mehr wegzudenken ist, wird sie in der industriellen Produktion jedoch zunehmend zu einem »Flaschenhals«. Vor allem die aktuelle Umstellung auf größere Wafer, von M2 auf M10 oder M12, ist mit Durchsatzeinbußen verbunden. Den wachsenden Geschwindigkeitsanforderungen kann momentan nur mit Parallelisierung begegnet werden.



*»On-the-fly«-Laserbearbeitung von Solarzellen gepaart mit der Polygon-scan-Technologie.*

Die maximale Geschwindigkeit, mit der der Strahl auf dem Wafer bewegt wird, ist durch die Leistungsfähigkeit des Laserscanners begrenzt. Bisher kommen zumeist Galvanometer-scanner zum Einsatz, die den Strahl mit zwei hochdynamisch angetriebenen Spiegeln auf bis zu 50 m/s beschleunigen. Eine alternative Technologie stellen Polygonscanner dar, die noch wesentlich höhere Zustellgeschwindigkeit erreichen können. Dabei lenkt ein Polygonrad, bestehend aus mehreren reflektierenden Facetten, den Laserstrahl mit bis zu 1 km/s über das Bearbeitungsfeld. Senkrecht dazu wird der Laserstrahl von einem Galvanometer-Scan-Spiegel positioniert, sodass eine zweidimensionale Struktur erzeugt werden kann.

Am Fraunhofer ISE haben wir im Rahmen der vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekte [»PoLariS«](#) und [»NextTec«](#) einen Demonstrator zur Hochdurchsatz-Lasermaterialbearbeitung entwickelt, der diesen Scanner mit einer »On-the-fly«-Prozessierung kombiniert. »On-the-fly« steht für eine Bearbeitung des Werkstücks, während es sich bewegt. Ein Transportband führt die Solarzelle unter dem Laserscanner hindurch, wobei gleichzeitig die Prozessierung der Solarzelle erfolgt. Dadurch kann auf Linear- oder Drehtischzustellungen und somit auf Beschleunigung und Abbremsen verzichtet werden. Anlagentotzeiten beschränken sich auf ein Minimum.

Das Konzept vereint erstmals das hohe Geschwindigkeitspotenzial der Polygonscan-Technologie mit den Durchsatzvorteilen einer Inline-Prozessierung. Aufgrund der gleichförmigen Drehbewegung des Polygonrads können auch größere Spiegelflächen eingesetzt werden – was eine deutliche Steigerung von Brennweite und somit Bearbeitungsfeld ermöglicht. Erstmals konnten wir auf einer Bearbeitungsspur Laserkontaktöffnungen mit einem Durchsatz von mehr als 15 000 M2 Wafern pro Stunde bei gleichbleibender Zellqualität und -effizienz demonstrieren.

Unser Ziel ist, das Konzept auch für weitere, komplexere Laserprozesse zur Anwendung zu bringen. Für hocheffiziente Solarzellen sind feinere Strukturen und vor allem höhere Genauigkeit gefragt. Um diese trotz der hohen Bearbeitungsgeschwindigkeit zu erreichen, entwickeln wir eine optische Sensorik, die die Position des Wafers in Echtzeit verfolgt und dem Laserscanner Korrektursignale übermittelt. Damit kann der Strahl den Geschwindigkeitsschwankungen während des Prozesses folgen.

### Kontakt

Dr. Fabian Meyer  
Telefon +49 761 4588-2658  
[laser-otf@ise.fraunhofer.de](mailto:laser-otf@ise.fraunhofer.de)

# Kontaktlose Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie von Siliciumsolarzellen

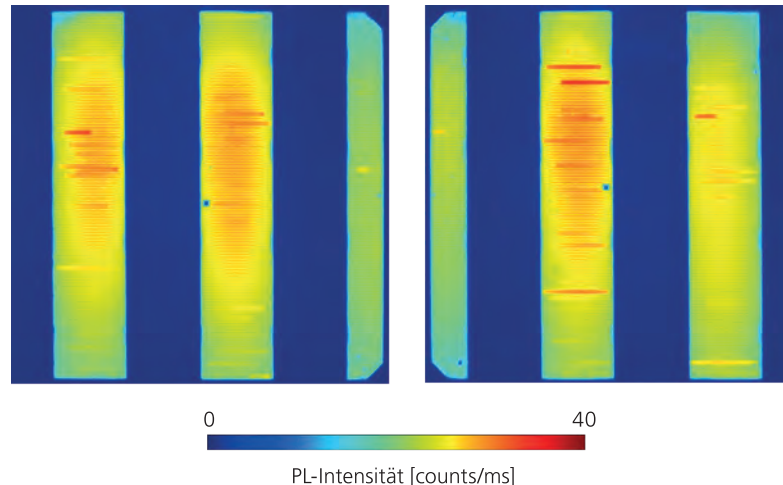
Um drohende Lieferengpässe abzufedern und die Herstellungskosten von Siliciumsolarzellen zu senken, ist ein hoher Produktionsdurchsatz nötig – ein entscheidender Faktor nicht nur für den PV-Ausbau in Deutschland, sondern weltweit. Ein Konsortium aus Anlagenbauern, Messtechnikherstellern und Forschungsinstituten unter Leitung des Fraunhofer ISE hat deshalb im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts »NextTec« ein Proof-of-Concept für die eine künftige Produktionslinie mit einem Durchsatz von 15 000 bis 20 000 Wafern pro Stunde erarbeitet. Dies entspricht mindestens einer Verdopplung des Durchsatzes verglichen mit aktuell eingesetzten Produktionssystemen.

Um bei der Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie (*I/V*-Kennlinie) – dem wichtigsten Charakterisierungsverfahren in der Fertigung – den Durchsatz zu steigern, haben wir in Kooperation mit der Universität von Neusüdwaales (Australien) ein neuartiges Verfahren entwickelt: Es ermöglicht eine kontaktlose Messung an der bewegten Solarzelle. Der Wegfall der zeitkritischen und mechanisch belastenden Kontaktierung erweist sich besonders für Multi-Busbar-Solarzellen als vorteilhaft, deren Kontaktierung kostenintensiv ist und zu einer Verringerung der Beleuchtungshomogenität führt.

Das Verfahren, für das das Fraunhofer ISE einen Patentantrag gestellt hat, basiert auf den folgenden vier Säulen:

- Photolumineszenz-Messungen mit variiertem Anregungsintensität zur Bestimmung der Pseudo-*I/V*-Kennlinie
- Kontaktlose Elektrolumineszenz-Anregungsspektroskopie zur Bestimmung der relativen Quanteneffizienz
- Spektroskopische Reflektionsmessungen zur Skalierung der relativen auf absolute Quanteneffizienz
- Photolumineszenz-Messungen unter Teilverschattung der Zelle zur Bestimmung des internen Serienwiderstands der Solarzelle (Abb.)

Wir haben das Verfahren für aktuelle Solarzellentypen (PERC, TOPCon, SHJ) im Labor demonstriert. Für alle Leistungsparameter der untersuchten Solarzellen konnten wir gute Korrelationen zwischen kontaktierten und kontaktlosen Messdaten



*Photolumineszenz-Aufnahmen einer teilverschatteten Solarzelle zeigen u.a. Unterbrechungen in der Metallisierung.*

feststellen: Die Abweichungen zwischen den kontaktierten und berührungslos gemessenen Stromspannungsparametern ( $j_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ,  $FF$ ,  $pFF$ ,  $\eta$ ) liegen unter 2,5 %<sub>rel</sub>, sind also vergleichbar mit der typischen absoluten Messunsicherheit zertifizierter Prüflabore. Wir konnten zeigen, dass die berührungslose Bestimmung von Strom-Spannungs-Kennlinien möglich ist. Die für die Messung erforderliche Zeit wird lediglich durch die Zellphysik, nicht durch die Messtechnik, begrenzt.

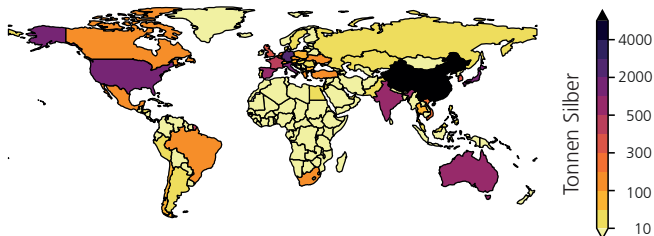
Das Verfahren hat zahlreiche Vorteile: Neben einem höheren Durchsatz geht es schonender mit den Solarzellen um, führt zu weniger Verschleißteilen und erlaubt außerdem die Erhebung zusätzlicher Messdaten. Diese Vorteile werden wir in künftigen Forschungs- und Entwicklungskollaborationen demonstrieren und schließlich auf Prototypen- und Produktbasis weiterentwickeln.

## Kontakt

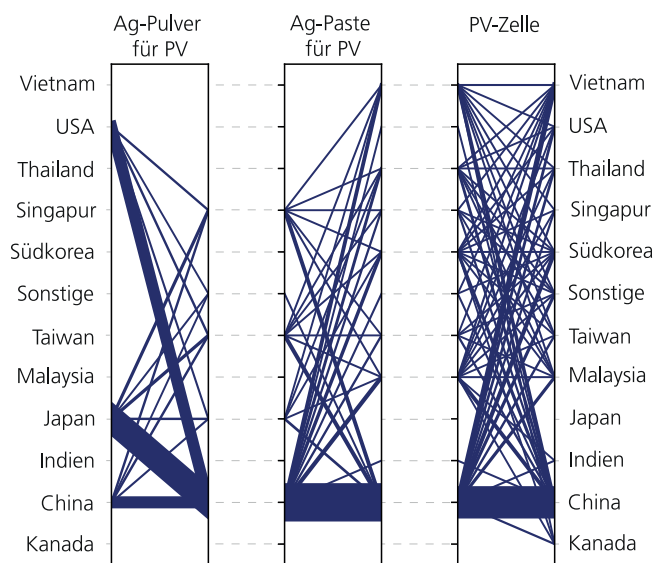
Dr. Johannes Greulich  
Telefon +49 761 5488-5829  
sipv.metrology@ise.fraunhofer.de



## Widerstandsfähigere Materiallieferketten durch Risikoanalyse



*Silber in PV-Modulen, die von 2000 bis 2020 installiert wurden; weltweit wurden 20 Kilotonnen Silber in PV-Installationen verbaut.*



*Ag-Lieferketten für PV.*

Intakte Rohstofflieferketten sind für die Weltwirtschaft essenziell. Aufgrund zunehmender Spezialisierung und Komplexität sind sie jedoch immer anfälliger für Versorgungsrisiken. Um Engpässe zu vermeiden, gilt es, Unternehmen für dieses Risiko zu sensibilisieren.

Am Fraunhofer ISE haben wir eine Risikoanalyse für die Lieferketten der kritischen Rohstoffe durchgeführt, die für die Wertschöpfungskette der kristallinen Silicium-Photovoltaik (PV) entscheidend sind. So haben wir für Silber, das für die Metallkontakte der Solarzellen verwendet wird, die Vertriebswege vom Silberabbau bis zur Installation modelliert. Unser Modell berücksichtigt sowohl den zeitlichen Verlauf über die letzten Jahrzehnte als auch die Differenzierung auf Landesebene. Es gibt Aufschluss über die jeweiligen Versorgungsmuster und die Länder, die eine Schlüsselrolle bei der Beförderung von Silber spielen. Darüber hinaus lassen sich die ökologischen, sozialen und Governance-Hotspots (ESG), die mit jedem Verarbeitungsschritt verbundenen sind, ermitteln.

Die Versorgungsrisiken für die Photovoltaik sind vielfältig: Erstens birgt die hohe Marktkonzentration bei der Herstellung von Silberpulver und Silberpaste kurz- und mittelfristig das Risiko von Lieferengpässen. Der Markt wird durch nur wenige Firmen dominiert. Die meisten von ihnen haben ihre Aktivitäten nach China verlagert, wo 2021 über 85 % der weltweiten Silberpastenproduktion konzentriert waren. Zweitens spitzen sich die geopolitischen Spannungen in den silberproduzierenden Ländern in den letzten zwanzig Jahren zu. Unter Verwendung der Weltbank-Governance-Indikatoren haben wir geschätzt, dass etwa 35 % des in der Photovoltaik verwendeten Silbers durch mindestens ein Land mit einem hohen Risiko politischer Instabilität oder politisch motivierter Gewalt transportiert wird. Drittens besteht die Gefahr, dass die für die nächsten Jahre zu erwartende rasche Expansion der PV nicht mit dem Rhythmus der Mineneröffnungen und -produktion Schritt halten kann. Dies erfordert eine Steigerung der Materialeffizienz und die Ermittlung der Silbervorräte.

Die seit den 2000er Jahren installierten Solarzellen stellen eine wichtige Quelle für Sekundärsilber dar. Deutschland konzentriert beispielsweise fast 3000 Tonnen Silber in seinen installierten PV-Modulen. Unsere Ergebnisse sind ein erster Schritt zum Aufbau widerstandsfähigerer und verantwortungsvoller Lieferketten – ein Thema, das mit der Einführung der EU-Nachhaltigkeitsvorschriften zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

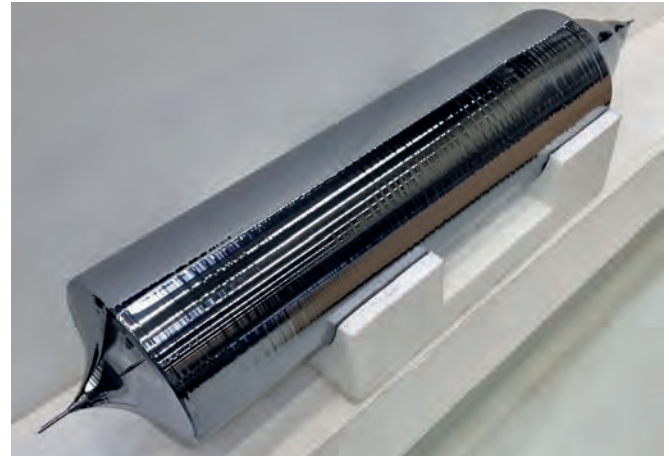
### Kontakt

Estelle Gervais  
Telefon +49 761 4588-5499  
sipv.assessment@ise.fraunhofer.de

# p-Typ Si-Solarzellen mit ladungsträgerselektivem Halbleiterübergang und passivierten Kontakten

Die industrielle Herstellung von Solarzellen erfährt derzeit einen Übergang hin zu hocheffizienten Solarzellen mit ladungsträgerselektiven Halbleiterübergängen und passivierten Kontakten. Insbesondere das am Fraunhofer ISE entwickelte Hochtemperaturkonzept TOPCon (Tunnel Oxide Passivated Contact) gewinnt neben den sogenannten Heterojunction-Solarzellen (HJT) zunehmend Marktanteile. Dabei setzen Hersteller statt der bisher verwendeten p-Typ um 8 % bis 10 % teurere n-Typ Cz-Si-Wafer ein.

Ziel unserer Forschungsarbeit ist, zu evaluieren, ob es Wege gibt, weiter die erheblich kostengünstigeren p-Typ Cz-Si-Wafer einzusetzen. Bei nahezu identischer Prozessierung auf p-Typ anstatt auf n-Typ Cz-Si-Ausgangsmaterial wird aus einer TOPCon-Solarzelle mit Halbleiterübergang an der Vorderseite eine TOPCoRE-Solarzelle (Tunnel Oxide Passivated Contact with Rear Emitter) mit Halbleiterübergang an der Rückseite. Damit sind hohe Diffusionslängen für Minoritätsladungsträger erforderlich, um höchste Wirkungsgrade erzielen zu können. Bei HJT-Solarzellen auf p-Typ anstatt n-Typ Cz-Si-Wafern wandert der Halbleiterübergang von der Rückseite an die Vorderseite der Solarzelle. Allerdings befinden sich bei dieser Niedertemperaturprozessroute ladungsträgerselektive Heterohalbleiterübergänge zu amorphem Silicium sowohl an der Vorderseite als auch an der Rückseite der kristallinen Si-Wafer. Damit sind auch hier hohe Diffusionslängen entscheidend für den Erfolg derartiger Solarzellen. Um hohe Diffusionslängen auf p-Typ Cz-Si-Material zu ermöglichen, haben wir Gallium als Dotierstoff verwendet und die Dotierstoffkonzentration bewusst abgesenkt, ohne dabei die Herstellungsmethode zu ändern oder damit verbundene Kosten für p-Typ Cz-Si zu erhöhen. Das so hergestellte p-Typ Material wurde systematisch entlang der kompletten Länge – 10000 Wafer – der Cz-Si-Stäbe hinsichtlich der Eignung für die genannten Hocheffizienzsolarzellenkonzepte evaluiert.

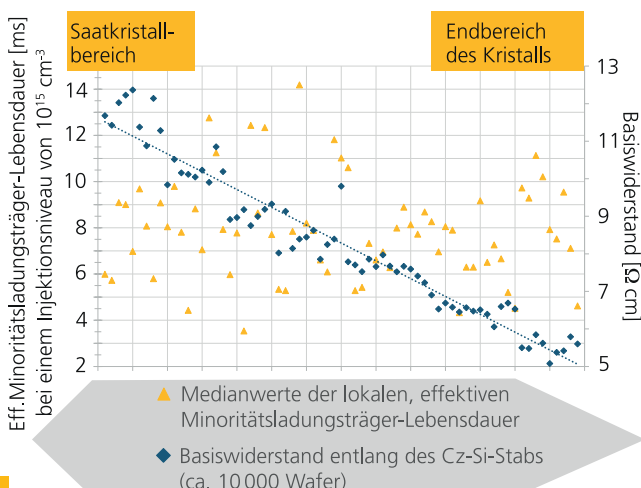


Typischer Cz-Si-Einkristall vor der Waferherstellung (Saatbereich links).

Das Material zeigt in allen Bereichen des Cz-Si-Wachstums sehr hohe Lebensdauern. Aufgrund der 2,6-fach höheren Mobilität der Minoritätsladungsträger in p-Typ Material ergeben sich daraus Diffusionslängen, die denen von derzeit kommerziell eingesetzten n-Typ Cz-Si-Wafern überlegen sind.

TOPCoRE-Solarzellen zeigten bei gleicher Prozessierung inzwischen bereits einen Wirkungsgradvorteil von bis zu 0,2 % gegenüber den n-Typ TOPCon-Solarzellen. Rechnet man die erheblich geringeren Waferkosten hinzu, so resultiert daraus ein signifikanter Kostenvorteil für die industrielle Anwendung.

Bei den HJT-Solarzellen liegt der Wirkungsgrad für das p-Typ Material bislang noch um mindestens 0,2 % unter dem für n-Typ Material. Hier sind weitere Anpassungen erforderlich, um den Füllfaktor und die Wirtschaftlichkeit zu verbessern.



Verlauf des Basisswiderstands für repräsentativ ausgewählte Wafer entlang des Cz-Si-Einkristalls und zugehörige effektive Lebensdauer der Minoritätsladungsträger.

## Kontakt

Dr. Jörg Horzel  
Telefon +49 761 4588-2180  
sipv.hieta@ise.fraunhofer.de

## Erfolgreiche Industrialisierung der Matrix-Schindeltechnologie

Dächer und Fassaden bieten riesige, noch weitgehend ungenutzte Potenziale für die Produktion von Solarstrom. Ihre Erschließung rückt die ambitionierten Ausbauziele der Energiewende in greifbare Nähe. Die Matrix-Schindeltechnologie als innovatives Verfahren, Solarzellen zu verbinden, bietet hier große Vorteile: Bei der Matrix-Schindelverbindung entstehen keine Zwischenräume, sodass die zur Verfügung stehende Fläche komplett mit Solarzellen bedeckt werden kann. Dadurch ist die aktive Fläche im Vergleich zu herkömmlichen PV-Modulen wesentlich größer; die Moduleffizienz steigt. Ein Kleber verbindet die Zellstreifen aus rechteckigen Solarzellen im überlappenden Bereich elektrisch. Zellverbinder werden nicht benötigt, wodurch optische Verluste aufgrund von Verschattung und Widerstandverlusten geringer ausfallen. Die Verbindung von geschindelten Solarzellen kommt ohne Blei als Zusatzstoff aus. Darüber hinaus ermöglichen die Matrix-Schindelmodule mit ihrem gleichmäßigen Erscheinungsbild die Herstellung von optisch sehr ansprechenden PV-Modulen.

Gemeinsam mit seinen Industriepartnern hat das Fraunhofer ISE die Matrix-Schindeltechnologie im Projekt »Shirkan«, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert wird, erfolgreich in die industrielle Umsetzung überführt. Es wurde ein Stringer entwickelt, der einen Durchsatz von 12 500 Schindelsolarzellen pro Stunde erreicht. Der erste Prototyp dieser Matrix-Verbindungsanlage

wurde am Fraunhofer ISE in Betrieb genommen und steht Industriepartnern für den Bau von Prototypmodulen zur Verfügung.

Die Herstellung erster Produktionsserien mit Matrix-Schindelmodulen im Vollformat war sehr erfolgreich. Der Stringer kann ohne weiteres auch flexible Modulgrößen, Formen und Deckungsgrade für Anwendungen der gebäudeintegrierten Photovoltaik (BIPV) realisieren. Mit dem Anlagenkonzept hat der Projektpartner M10 Solar Equipment GmbH sowohl den Intersolar Award 2022 als auch den Deutschen Innovationspreis 2022 gewonnen. Das Fraunhofer ISE hat verschiedene Modulkonzepte entwickelt und mit herkömmlichen Modulen verglichen. Dabei hat sich gezeigt, dass Matrix-Schindelmodule unter Teilverschattung je nach Szenario bis zu drei Mal so viel Ertrag erwirtschaften können wie herkömmliche PV-Module. Darüber hinaus ergeben Kostenrechnungen, dass die Herstellungskosten für Matrix-Schindelmodule nicht höher sind als die Herstellungskosten, die für herkömmliche PV-Module anfallen.

Damit sind die Grundlagen für den Aufbau industrieller Fertigungen auf Basis dieser innovativen Technologie gelegt. Auch die Gespräche mit interessierten Investoren sind sehr vielversprechend, sodass wir von einer industriellen Umsetzung im kommenden Jahr ausgehen.

*Vollformat-PV-Modul mit Matrix-Schindeltechnologie (links). Matrix-Schindelmodul mit Morpho-Color™-Beschichtung in Terrakottarot: Das optisch hochwertige Erscheinungsbild ist neben den technischen Vorteilen ein Alleinstellungsmerkmal der Matrix-Schindeltechnologie (rechts).*

### Kontakt

Achim Kraft  
Telefon +49 761 4588-5544  
pvmod.tech@ise.fraunhofer.de





## Automatisierte Fehlererkennung und optimierte Betriebsführung für PV-Kraftwerke

Mehr als 2,2 Millionen Photovoltaikanlagen mit einer Gesamtleistung von 59 GWp waren Ende 2021 in Deutschland in Betrieb und haben rund 9,8 % der öffentlichen Nettostromerzeugung geliefert. Mit dem höheren Betriebsalter der Photovoltaikanlagen nehmen (Teil-)Ausfälle und Abnutzungserscheinungen kontinuierlich zu. Steigender Wartungsbedarf und sinkende Solarerträge sind die Folge. Weil die Degradationserscheinungen schleichend stattfinden, konnten herkömmliche Überwachungssysteme sie bislang nicht erkennen. Bei den klassischen Ausfällen dagegen stellen die große Anlagenzahl und die Vielzahl der möglichen Fehlerursachen die Betriebsführung vor große Herausforderungen.

Im Projekt »OptOM«, gefördert durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), entwickeln wir zusammen mit der Pohlen Solar GmbH und der mondas GmbH neue Methoden zur automatischen Überwachung einer großen Zahl von PV-Kraftwerken. Dazu kombinieren wir regelbasierte und auf Machine-Learning basierte Methoden, um die mit dem Betriebsalter einhergehenden Anlagenausfälle zu erkennen, zu klassifizieren und den individuellen Ertragsausfall zu quantifizieren. Ziel ist, eine ökologisch und ökonomisch nachhaltige Strategie zum Betrieb der über 3000 von der Pohlen Solar GmbH betreuten PV-Kraftwerken zu entwickeln.

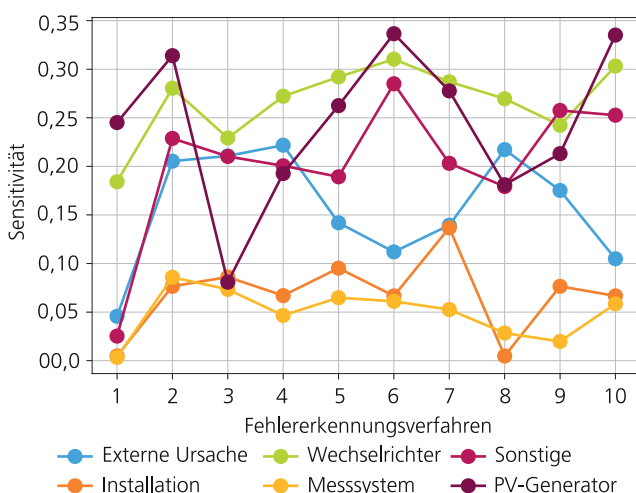
Bei unseren Tests haben wir die Reparatur- und Wartungsprotokolle der Anlagen aus dem Anlagenportfolio als Referenz verwendet, um die Genauigkeit der Fehlererkennung zu messen und die Sensitivität der verschiedenen Methoden zu ermitteln. Die Erkennungsrate aller ertragsrelevanten Ausfälle liegt nun bei 99 %. Dagegen konnte die große Zahl nicht relevanter Störmeldungen, unpräziser Fehlerzuordnungen sowie unnötiger Vor-Ort-Einsätze bereits deutlich reduziert werden. In den folgenden Entwicklungsschritten sollen entsprechende



*Die im Projekt entwickelten Verfahren wurden direkt in ein Produktionssystem übertragen und sind im Echtzeitbetrieb im Einsatz.*

Algorithmen Zusammenhänge zwischen ungewöhnlichen Betriebszuständen und Anlagenausfällen erkennen. Betreibern von Photovoltaikkraftwerken wird es dadurch möglich, geeignete Servicearbeiten zu priorisieren, bevor es zu einem Stör- und damit Ertragsausfall kommt.

Die mondas GmbH hat die im Projekt entwickelten Methoden in ihre Softwareplattform für technisches Monitoring implementiert. Die im Projekt entwickelte Webanwendung unterstützt die Pohlen Solar GmbH bereits jetzt dabei, Fehler effizient zu erkennen, präventive Wartungseinsätze zu planen und Störungseinsätze anhand des erwartbaren Ertragsausfalls zu priorisieren. Zur breiteren kommerziellen Nutzung der Projektergebnisse wurde im August 2021 die Enmova GmbH gegründet, die hochperformante IT-Lösungen für das digitale Betriebsmanagement von Photovoltaikkraftwerken anbietet.



*Sensitivität für zehn verschiedene Verfahren in Abhängigkeit der Fehlerkategorie. Die Kombination aller Verfahren erkennt 99 % aller Anlagenausfälle.*

### Kontakt

Anna Heimsath  
Telefon +49 761 4588-5944  
pvmod@ise.fraunhofer.de



## Potenzialerschließung der Agri-Photovoltaik in Baden-Württemberg

Agri-Photovoltaik (Agri-PV) bringt Solarstromerzeugung und Landwirtschaft zusammen und schafft so Synergieeffekte ohne Flächennutzungskonflikte. Im Rahmen des Projekts »Erste Umsetzungsphase der Modellregion Agri-Photovoltaik für Baden-Württemberg« hat das Fraunhofer ISE gemeinsam mit 13 weiteren Projektpartnern zwei Praxis- und drei Forschungsanlagen gebaut und in Betrieb genommen. Das Projekt wird vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM) und dem Ministerium für Ernährung, Ländlichen Raum und Verbraucherschutz Baden-Württemberg (MLR) gefördert. Ziel ist, möglichst viele Erkenntnisse über unterschiedliche Kulturpflanzen und Standorte zu gewinnen. Außerdem sollen mit Unterstützung der Hochschule für öffentliche Verwaltung Kehl die verwaltungsrechtlichen Hürden bei der Realisierung einer Agri-PV-Anlage identifiziert und adressiert werden. Die landwirtschaftlichen Untersuchungen führen das Landwirtschaftliche Technologiezentrum Augustenberg, das Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee und die Staatliche Lehr- und Versuchsanstalt für Wein- und Obstbau durch.

Unsere Anlage in Kressbronn am Bodensee (239 kWp) ist die erste Agri-PV-Anlage, die im Rahmen des Projekts errichtet, eingeweiht und ans Netz angeschlossen wurde. Sie ist zugleich deutschlandweit die erste stromproduzierende Anlage im Apfelbau, die in eine Vollertragsplantage integriert wurde. Die Anlage verfügt über eine variierende Beschattung von Modulen mit zwei Transparenzgraden (51 % und 40 %), deren Effekte auf die Ökophysiologie der Äpfel ebenso untersucht werden soll wie mögliche Auswirkungen von Pflanzenschutzmitteln auf die PV-Module.

Unter einer weiteren, vollbelegten Anlage in Nussbach (geplant mit mindestens 710 kWp) werden überwiegend Äpfel und Zwetschgen angebaut. Dabei steuern zwei Trackingachsen die Module, wobei ein Anlagenteil strom-, der andere pflanzenorientiert nachgeführt wird. Hohe Ernteerträge würden bedeuten, dass man auch mit Standardmodulen ein dem Pflanzenbau zuträgliches Agri-PV-System realisieren kann. Dies hätte – verglichen mit semitransparenten Modulen – den Vorteil einer deutlichen Kostenreduktion.

Aktuell befindet sich in Heuchlingen eine Anlage (115 kWp) mit semitransparenten Modulen im Bau, deren Lichtverfügbarkeit bei 70 % liegt. Sie soll Strauch- und Erdbeeren überdachen und durch ihr geschlossenes Design das Mikroklima positiv beeinflussen. Mithilfe der Dachstruktur mit Drainagesystem kann ganzjährig Regenwasser gesammelt, gespeichert und zur Bewässerung verwendet werden. Ein zirkulierendes Wassermanagement soll zudem die Versickerung von Nitraten verhindern.

In der Anlage in Bavendorf (227 kWp), bei der die gleichen Module im Einsatz sind wie in Heuchlingen, untersuchen wir zusammen mit dem Kompetenzzentrum Obstbau Bodensee anhand vier verschiedener Apfelsorten den Einfluss einer Agri-PV Anlage im biologischen Anbau. Die Anlage besteht aus einem statischen und einem nachgeführten Teil und verfügt über einen statischen bzw. nachgeführten Teil mit Referenzfläche. Die Errichtung einer weiteren Anlage (400 kWp) in der gleichen Bauart ist für das Frühjahr 2023 in Augustenberg geplant. Hier sollen die bifazialen Module im statischen Teil bestehende Apfel- und Birnbäume überdachen; die Unterkonstruktion wird der Einnetzung gegen Schadinsekten dienen.

*Erste Äpfel der Sorte Gala wachsen unter der Agri-PV-Anlage in Kressbronn.*

### Kontakt

Oliver Hörnle  
Telefon +49 761 4588-2501  
pvmod.apv@ise.fraunhofer.de

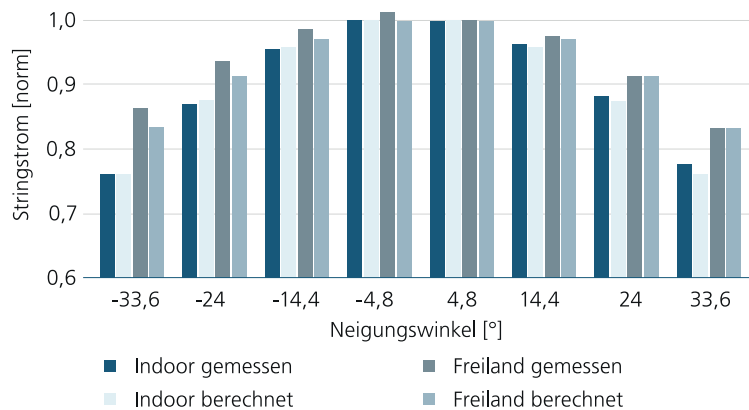


# Prüfmethoden für integrierte PV-Anwendungen am Beispiel der fahrzeugintegrierten Photovoltaik

Die Integration von Photovoltaik in unterschiedliche Flächen und Anwendungen erschließt enorme Potenziale, verlangt aber auch eine sorgfältige Analyse der spezifischen Anforderungen. Dies betrifft insbesondere grundlegende Konformitätsüberlegungen hinsichtlich rechtlicher oder normativer Voraussetzungen für die PV-Module. Im Falle der fahrzeugintegrierten PV (VIPV) ist beispielsweise die Vereinbarkeit mit den gängigen KFZ-Zulassungsverfahren zu prüfen. Darüber hinaus müssen im Kontext neuer Anwendungen auch etablierte Mess- und Prüfverfahren für PV-Module neu bewertet werden: Form, Größe, Materialien, Anforderungen an Langzeitstabilität und die Gewichtung der betrachteten Moduleigenschaften können deutlich von herkömmlichen PV-Kraftwerken abweichen. So ist im Bereich der bauwerkintegrierten Photovoltaik (BIPV) ein gleichbleibendes Erscheinungsbild über sehr lange Anwendungszeiträume von großer Relevanz.

Die Entwicklung von angepassten Mess- und Prüfverfahren ist ein komplexes Forschungsgebiet, das für den Erfolg der integrieren PV von enormer Bedeutung ist. Am Fraunhofer ISE beschäftigen wir uns mit der Schaffung der wissenschaftlichen Grundlagen und engagieren uns in normativen Gremien. So haben wir in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »Lade-PV« die erste grundlegende Gegenüberstellung von Anforderungen aus der KFZ-Technik (u.a. ISO 16750) mit sicherheitsrelevanten Standards für Module (IEC 61730) vorgenommen, um Synergien sowie Anpassungsbedarfe abzuleiten.

In dem ebenfalls vom BMWK geförderten Projekt »3D« erarbeiten wir Methoden zur Vermessung von gebogenen PV-Modulen. Um diese hinsichtlich ihrer elektrischen Eigenschaften laborübergreifend vergleichbar zu charakterisieren, müssen neue Methoden und Korrekturverfahren definiert und vereinheitlicht werden. Das betrifft beispielsweise die Definition der Referenzebene im Modul sowie die rechnerische Anpassung



Vergleich der berechneten und gemessenen Ströme im Sonnensimulator und im Freiland für Einzelstrings eines stark gewölbten Moduls (Biegeradius 1 m).

nicht senkrecht einfallender Strahlung. Das Fraunhofer ISE beteiligt sich an der internationalen Abstimmung im Rahmen der IEC-Normung, indem es z.B. einen internationalen Ringvergleich zur Vermessung von gebogenen Modulen unterstützt und Indoor-Outdoor-Vergleichsmessungen zur Verifikation der Laborergebnisse für Leistung und Winkelabhängigkeit durchgeführt hat.

Die Messdaten in der Grafik zeigen den Effekt einer gewölbten Form auf den Modulstrom. Die Zellstrings des Moduls wurden dabei einzeln herausgeführt, und bei der Berechnung der Ströme, der Abstand des Messobjekts zur Lichtquelle sowie die Divergenz des Lichts berücksichtigt. Die Berechnungen stimmen gut mit Messungen überein. In den äußersten Strings gibt es erwartungsgemäß die größten Abweichungen zum Freiland, da dort die Objektebene die größte Winkelabweichung zur Referenzebene aufweist. Dies kann über Korrekturfaktoren ausgeglichen werden. Voraussetzung hierfür ist, dass der Strahlengang des Labormessgerätes (Flasher) möglichst gerichtet, homogen und gut beschrieben ist.



Prüfung eines VIPV-Moduls.

## Kontakt

Daniel Philipp  
Telefon +49 761 4588-5414  
pvmmod.vipv@ise.fraunhofer.de

## Farbige Abdeckscheiben für solarthermische Kollektoren

Die Wärmeerzeugung mit solarthermischen Kollektoren stellt einen wichtigen Baustein zum Erreichen einer vollständig erneuerbaren Energieversorgung in Deutschland dar. Bislang fehlten jedoch Konzepte für ästhetisch gut in Gebäude integrierbare Kollektoren. Dies betrifft neben Neubauten besonders auch ältere Stadtkerne und denkmalgeschützte Gebäude. Die Technologien, die dem Stand der Technik entsprechen, weisen entweder eine sehr geringe Farbsättigung oder hohe Wirkungsgradverluste auf.

Basierend auf der vom Fraunhofer ISE patentierten [Morpho-Color®-Technologie](#) haben wir in dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »Farbkollektor« farbige Abdeckscheiben für solarthermische Kollektoren entwickelt. Die Scheiben weisen drei wesentliche Vorteile auf: eine hohe Farbsättigung, eine hohe Lichttransmission – 90 % im Vergleich zu herkömmlichen Kollektoren – sowie eine gute Farbstabilität unter verschiedenen Betrachtungswinkeln.

Die Inspiration für die MorphoColor®-Farbschicht kam von den Mikrostrukturen auf den Flügeln des Morpho-Schmetterlings, der in den Wäldern Mittel- und Südamerikas vorkommt. In unserem Ansatz entsteht die Farbwirkung durch die Wechselwirkung von geometrischen Strukturen und Interferenzschichten auf der Innenseite des Abdeckglases.

Durch eine 3D-Simulation der optischen Eigenschaften haben wir optimale Oberflächenstrukturen und Interferenzschichten identifiziert. Nach der Optimierung der Schichten auf Laboranlagen wurde der Beschichtungsprozess auf die industrielle



*Farbiger, solarthermischer Kollektor bei der Bewitterung auf dem Outdoor-Teststand des Fraunhofer ISE.*

Anlage bei unserem Projektpartner AGC Interpane transferiert. Es ist uns gelungen, die Beständigkeit der Beschichtung für die Anwendung im Kollektor nachzuweisen und den Wirkungsgrad zu messen. Für die Farben Rot, Grün und Blau haben wir einen Wirkungsgrad > 90 % im Vergleich zu einer unbeschichteten Referenzscheibe festgestellt. Beim Solar-Keymark-Ausschuss wurde ein vereinfachter Prozess für die Zertifizierung von Kollektoren mit MorphoColor®-Glas definiert, was die Marktgängigkeit unterstützt. Die Voraussetzung ist eine bestehende Solar-Keymark-Zertifizierung eines Flachkollektors derselben Bauart. Darüber hinaus haben wir Demokollektoren in den Farben Silbergrau sowie Gold hergestellt. Daran anschließend hat unser Industriepartner AGC Interpane etwa 120 m<sup>2</sup> farbige Abdeckscheiben produziert, mit denen der Kollektorbauer Siko solarthermische Kollektoren ausstattete. Sie kamen in zwei Pilotanlagen in Freiburg sowie in Jenbach/Tirol zum Einsatz und wurden messtechnisch ausgewertet.

Zusätzlich zu der unten gezeigten Aufdachinstallation eignen sich die entwickelten farbigen Kollektoren zur ansprechenden Gestaltung von Fassaden mit Solarthermie.

*Pilotinstallation mit farbigen, solarthermischen Kollektoren in Freiburg St. Georgen.*

### Kontakt

Dr. Thomas Kroyer  
Telefon +49 761 4588-5968  
[soltherm.materials@ise.fraunhofer.de](mailto:soltherm.materials@ise.fraunhofer.de)





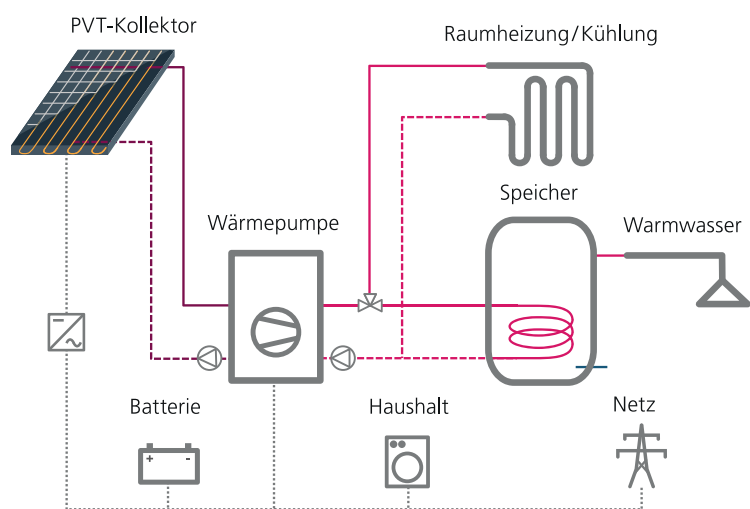
## integraTE – innovative Systemlösungen für die Raumheizung und -kühlung

Das Zusammenwirken erneuerbarer Energien aus verschiedenen Quellen ist ein wichtiger Faktor, um CO<sub>2</sub>-Einsparungen im Gebäudesektor zu erzielen. Dies gilt für Bestandsgebäude ebenso wie für den Neubau. Eine innovative Systemlösung ist die Kombination aus einer Wärmepumpe und photovoltaisch-thermischen Kollektoren (PVT). Dabei wird sowohl der von den PVT-Kollektoren zur Verfügung gestellte Strom als auch die Wärmeenergie als Quelle für die Wärmepumpe genutzt. Die Kombination von PVT mit einer Wärmepumpe bietet als Systemkonzept vielversprechende Entwicklungs- und Optimierungsmöglichkeiten. Zu nennen sind dabei beispielsweise die verschiedenen Varianten der hydraulischen Verschaltung mit zusätzlichen Energiespeichern an verschiedenen Einbindungspunkten, die unterschiedlichen Flächendimensionierungen der Kollektoren sowie erweiterte Betriebsmodi der Wärmepumpen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts »[integraTE](#)« begleitet das Fraunhofer ISE den Zusammenschluss von Anbietern dieser Systeme wissenschaftlich. Ziel ist, die technologische Reife zu demonstrieren, Verbesserungspotenziale zu identifizieren und den Markt weiter für diese hocheffektive Wärmeversorgungs-lösung vorzubereiten. Teilweise sind reversible Wärmepumpen mit der Möglichkeit der Kältebereitstellung verbaut. Das Projekt umfasste Simulationsarbeiten, die vom Institut für Solarenergieforschung Hameln durchgeführt wurden, ebenso wie die Marktanalyse, die das IGTE der Uni-Stuttgart erstellt hat. Das Fraunhofer ISE beteiligte sich mit einer Messkampagne, die die Performance von neun Installationen im Feld analysierte. Die erhobenen Daten und Ergebnisse werden unter Federführung unseres Medienpartners Solrico aufbereitet und in Fachartikeln publiziert – beispielsweise in Schulungsunterlagen des Installationshandwerks, von Fachverbänden wie dem Bundesverband Wärmepumpe (BWP), dem Bundesverband Solarwirtschaft e. V. sowie dem Bundesverband der Deutschen Heizungsindustrie (BDH). Das Material – Ertragsinformationen, Betriebsergebnisse und weitere Auswertungen – steht zudem für wissenschaftliche Fachtagungen, aber auch für Marketingaktivitäten- und Medienarbeit, unter [pvt-energie.de](http://pvt-energie.de) zur Verfügung.



Demonstrationsanlage mit PVT-Kollektorfeld.



Schemazeichnung einer Kombination von Wärmepumpe und PVT-Kollektoren.

### Kontakt

Dr. Korbinian Kramer  
Telefon +49 761 4588-5354  
[building.concepts@ise.fraunhofer.de](mailto:building.concepts@ise.fraunhofer.de)



## LC150 – Propan-Kältekreise mit deutlich reduzierten Füllmengen



*Wärmepumpen als zentraler Baustein der Wärmewende.*

Als zentraler Baustein der Wärmewende wird der Bedarf an Wärmepumpen in den nächsten Jahren stetig wachsen. Umso bedeutender ist die Erforschung nachhaltiger Kältemittellösungen. Ein hohes Potenzial bietet das Kältemittel Propan, das durch sehr gute thermodynamische Eigenschaften und ein geringes Erderwärmungspotenzial besticht. Nachteilig ist die Brennbarkeit. Um diesen Nachteil zu minimieren, ist die Reduktion des Kältemittels auf unter 150 g ein vielversprechender Ansatz.

Seit Ende 2020 arbeitet das Fraunhofer ISE in Kooperation mit führenden europäischen Wärmepumpenherstellern im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »LC150« (Low Charge 150 g) an einem standardisierten Kältekreis für Wärmepumpen, der hohe Effizienzen bei geringen Kältemittelmengen ermöglicht. In mehr als 5000 Messungen wurden hierfür bereits achtzehn Kältekreisprüflinge an einer weitgehend automatisierten

Messinfrastruktur im [Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien des Fraunhofer ISE](#) vermessen. Ziel ist, die beste Kombination von Verdampfer, Kondensator und Verdichter zu identifizieren und Potenziale für eine weitere Kältemittelreduktion zu erschließen. In der angestrebten Leistungsklasse von 6 bis 10 kW gelang es uns bereits mit mehreren Prüflingen, einen »Seasonal Coefficient of Performance« (SCOP) zu erreichen, der die Anforderungen des Bundesamts für Wirtschaft und Ausfuhrkontrolle (BAFA) zur Förderfähigkeit erfüllt. Der aktuell beste Prüfling erzielt mit einer Kältemittelmenge von 124 g eine Heizleistung von 12,5 kW bei einer saisonalen Effizienz von 4,7 (SCOP).

Am Ende des Projekts wird eine Vielzahl verschiedener Kältekreisconstellationen die Tests durchlaufen haben. Damit gewinnt das Team der Forschenden eine enorme Datenmenge, die für die Bewertung und simulative Auslegung von Wärmepumpen zur Verfügung steht.

Mit der Reduktion des Kältemittels Propan um 70 % bis 80 % gegenüber dem Stand der Technik sowie der Standardisierung der Fertigung legt das Projekt »LC150« die Basis für eine schnelle und unkomplizierte Markteinführung von effizienten, kostengünstigen Wärmepumpen in den Wohnungsmarkt. Durch den sukzessiv steigenden Anteil erneuerbarer Energien am Strommix kann sich bis 2030 damit für Wärmepumpen ein CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial von 80 % bis 90 % gegenüber einer Gasheizung ergeben.

### Kontakt

Dr. Katharina Morawietz  
Telefon +49 761 4588-5847  
lc150@ise.fraunhofer.de

*In einer breiten Messkampagne werden Dutzende von Wärmepumpenkomponenten-Kombinationen unter verschiedenen Betriebsparametern getestet.*



# Automatisierte Generierung von digitalen Anlagenschemata

Der Austausch von fossilen Heizungssystemen ist unabdingbar, um die klimapolitischen Ziele im Gebäudesektor zu erreichen. Eine Herausforderung sind dabei knappe Ressourcen im Fachhandwerk, die sich durch die Digitalisierung bestimmter Prozesse adressieren lässt. Ein zentrales Forschungsfeld ist in diesem Zusammenhang die automatisierte Erfassung und Identifikation gebäudetechnischer Anlagen (TGA).

Im vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderten Projekt »DiBesAnSHK« haben wir am Fraunhofer ISE eine Software entwickelt, die es – auf Grundlage eines Satzes von Hauptkomponenten (Wandler, Speicher und Übergabesysteme) – ermöglicht, automatisiert valide Anlagenkonfigurationen abzuleiten. Dabei verfolgen wir einen zweistufigen Ansatz: Im ersten Schritt werden die Komponenten zu einem schlüssigen Energieflussschema verbunden. Im zweiten Schritt werden die hydraulischen Komponenten (Ventile, Pumpen, Klappen) hinzugefügt und praxisrelevante Hydraulikschemata generiert. Ziel ist, auf Basis der ermittelten und digital repräsentierten Anlagenkonfigurationen eine detaillierte Planung und Dimensionierung vorzunehmen und anschließend ein automatisiertes Angebot zu erstellen.

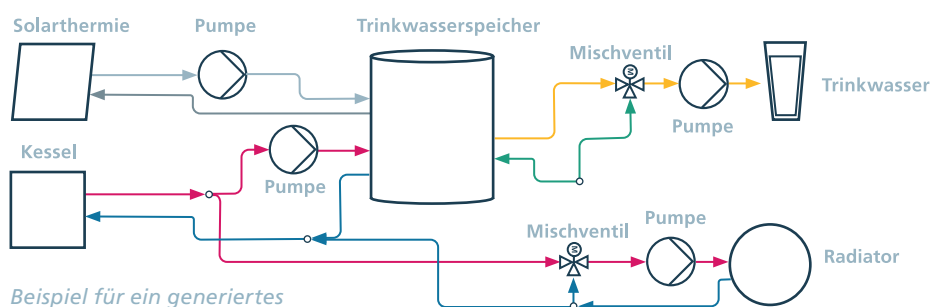
Ausgangspunkt für die Generierung von Anlagenschemata ist die Spezifikation der enthaltenen Hauptkomponenten und ihrer Anschlüsse – d. h. es wird festgelegt, welche Energieerzeuger und Übergabesysteme enthalten sind. Für jede dieser Komponenten ist definiert, welches Medium in die Komponente eintritt und welches Medium aus der Komponente austritt. Diese initialen Informationen können aus einer manuellen Eingabe stammen oder aus einer KI-gestützten Objektidentifikation mittels Video- und Bildaufnahmen des Heizungskellers automatisch erzeugt werden. Aus den Informationen über die Komponenten und ihre Anschlüsse generiert die Software dann mögliche energetische Konfigurationen.



Fotografische Erfassung von Bestandsanlagen.

Diese Energieflussdiagramme können in einer frühen Planungsphase bereits zur Analyse oder Simulation einer Anlage dienen. Anschließend ermittelt die Software für ein ausgewähltes Energieflussdiagramm die dazugehörigen Hydraulikschemata. Dabei werden Pumpen, Ventile und Verzweigungen automatisiert hinzugefügt und zusätzliche Verbindungen für Vorlauf und Rücklauf geschaffen. Das zweistufige Verfahren haben wir prototypisch in Python implementiert und die resultierenden Graphen mittels einer Javascript-Bibliothek visualisiert.

Im Projekt »DiBesAnSHK« haben wir den Fokus zunächst auf einfache, im Bestand weit verbreitete haustechnische Systeme und hydraulische Grundsaltungen gelegt. Die Lüftungstechnik sowie Kältebereitung haben wir bisher nicht betrachtet. Komplexere Systeme adressieren wir jedoch im weiteren Verlauf der Entwicklungen. Als weiterer Anwendungsfall ist zudem die automatisierte Analyse und Auswahl von Sanierungskonzepten geplant.



Beispiel für ein generiertes Hydraulikschemata.

## Kontakt

Nicolas Réhault  
Telefon +49 761 4588-5352  
building.control@ise.fraunhofer.de

## Mit einer Luftwand zu mehr Effizienz – Reduktion konvektiver Verluste in solarthermischen Kraftwerken

In Solarturmkraftwerken wird mithilfe von Spiegeln in großem Maßstab Sonnenlicht auf einen zentralen Strahlungsempfänger konzentriert, um dort sehr hohe Temperaturen zu erreichen. In bestehenden kommerziellen Kraftwerken wird die so gewonnene thermische Energie primär zur Stromerzeugung genutzt. Tagsüber kann die Wärme direkt in Strom gewandelt oder in großen Salzschnmelzetanks gespeichert werden. So kann in Zeiten hoher Nachfrage – insbesondere abends bzw. nach Sonnenuntergang – bedarfsgerecht Strom erzeugt werden.

Zahlreiche internationale Forschungsprojekte arbeiten an der Erhöhung der Fluidtemperatur im Strahlungsempfänger von derzeit bis ca. 650°C auf 1000°C und darüber hinaus. Sie führt zu einer deutlichen Effizienzsteigerung bei der Umwandlung von Wärmeenergie in Strom und ermöglicht außerdem chemische Hochtemperaturprozesse, wie sie z. B. für eine rein solarthermische Herstellung von Wasserstoff, synthetischen Kraftstoffen und Zement notwendig sind.



### Kontakt

Moritz Bitterling  
Telefon +49 761 4588-5978  
soltherm.systems@ise.fraunhofer.de

*Testaufbau eines solarthermischen Strahlungsempfängers. Die Düsen der unsichtbaren Luftwand befinden sich ober- und unterhalb der Receiver-Öffnung.*

Ein besonderes Augenmerk liegt auf der Reduktion von thermischen Verlusten, da diese in derzeitigen kommerziellen Kraftwerken durch das unerwünschte Abströmen von warmer Luft am Strahlungsempfänger im Bereich von 7 % der absorbierten Strahlung liegen. Mit einer weiteren Erhöhung der Betriebstemperaturen würden die thermischen Verluste ohne geeignete Gegenmaßnahmen stark ansteigen.

Um die Luftkonvektion am Strahlungsempfänger vollständig zu unterbinden, wäre es naheliegend, ein hochtemperaturstabiles Fenster zu verwenden. Wegen der dort auftretenden extremen Strahlungs- und Temperaturbelastungen ist es aber bis heute nicht gelungen, ein Fenster mit zufriedenstellender Lebensdauer herzustellen. Alternativ zu einem Fenster, z. B. aus Quarzglas, lässt sich das Abströmen der warmen Luft vom Strahlungsempfänger mit einer sogenannten »Luftwand« stark verringern. Dabei wird mit Düsen ein schneller, stark gebündelter flächiger Luftstrom erzeugt, der den Bereich mit heißer Luft von demjenigen mit Umgebungsluft abtrennt. So wird der ungewollte Wärmeabfluss stark reduziert. Vorteilhaft am Einsatz einer Luftwand ist einerseits ihre einfache und kostengünstige Installation bzw. Nachrüstung in bestehende Systeme. Andererseits tritt weder eine Abschwächung der transmittierten Strahlung durch Absorption oder Verschmutzung ein, noch können thermische Spannungen oder Defekte im Material auftreten wie bei einem Fenster.

Die Komplexität strömungstechnischer Fragestellungen lässt bislang keine belastbare Abschätzung des theoretisch möglichen Leistungsgewinns durch eine Luftwand auf Basis numerischer Simulationen zu. Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts »HelioGlow« hat das Fraunhofer ISE daher gemeinsam mit einem Industriepartner einen Außen-teststand für einen solarthermischen Strahlungsempfänger im Realmaßstab aufgebaut und mit einer Luftwandanlage ausgestattet. Um reproduzierbar messen zu können, ersetzt eine elektrische Heizung dabei die Solarstrahlung. Bei zahlreichen Tests der Luftwand konnten die konvektiven Verluste am Strahlungsempfänger um 30 % reduziert werden. Die gezeigte Reduktion der thermischen Verluste in dieser Größenordnung belegt die kommerzielle und wirtschaftliche Anwendungsfähigkeit der Luftwand-Technologie an Solarturmkraftwerken.



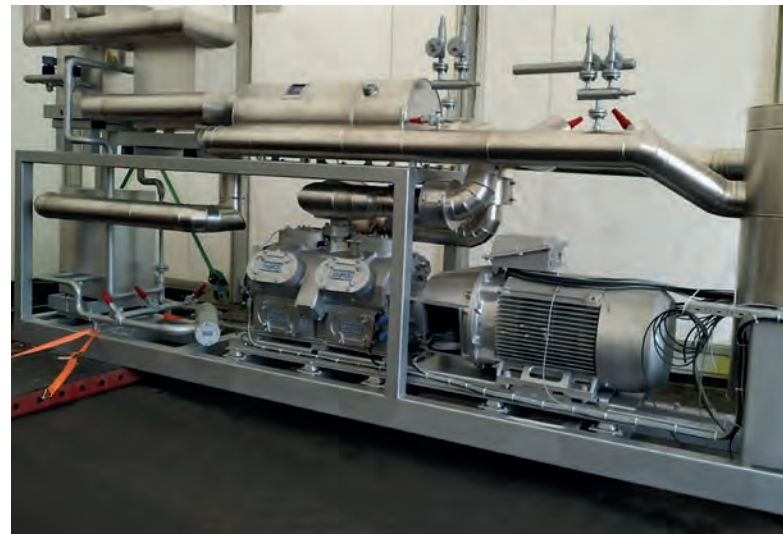
## Hochtemperatur-Wärmepumpen für die Industrie

Die Reduktion von Treibhausgasen und die effizientere Nutzung fossiler Energieträger sind von großer Bedeutung zur Erreichung der Klimaziele. Bei einem Anteil von ca. 57 % des Gesamtverbrauchs in Deutschland stellt eine nachhaltige Wärme- und Kälteversorgung ein großes Einsparpotenzial dar. Hochtemperatur-Wärmepumpen (HTWP) sind für die Bereitstellung von Prozesswärme und -dampf eine technische Alternative zu Verbrennungsprozessen und bieten die Möglichkeit, die CO<sub>2</sub>-Emissionen und die Abhängigkeit von fossilen Energieträgern zu senken.

In den letzten zwei Jahren haben wir die Forschungsaktivitäten am Fraunhofer ISE um den Bereich der industriellen Wärmepumpen für Temperaturen über 80 °C erweitert und entwickeln diese aktuell in zwei großen Forschungsprojekten weiter. Bei beiden liegt der Fokus auf natürlichen Kältemitteln. So konnten beispielsweise bereits brennbare Kohlenwasserstoffe wie Propan bei Hauswärmepumpen erfolgreich etabliert werden. Darauf aufbauend wollen wir nun durch unsere Forschungsarbeiten untersuchen, wie auch Großwärmepumpen für den industriellen Einsatz mit brennbaren Kohlenwasserstoffen sicher und effizient betrieben werden können.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte Projekt »[Forschungsplattform Kälte- und Energietechnik KETEC](#)«, eine Zusammenarbeit mit der TU Chemnitz und dem ILK Dresden, bietet hierzu eine Demonstrationmöglichkeit. Im Rahmen des Projekts bauen wir einen Wärmepumpenkreislauf mit Butan auf, anhand dessen wir verschiedene Verschaltungen wie beispielsweise einen Economizer, einen Flash-Tank oder eine parallele Verdichtung im Betrieb veranschaulichen können: Die Senktemperatur kann bis auf 150 °C angehoben werden, dynamische Änderungen der Quellen werden mit einem Quellenmodul simuliert und Messungen an den verschiedenen Verschaltungen können die jeweiligen Vor- und Nachteile aufzeigen. Im weiteren Verlauf wird der Teststand als Schulungsobjekt dienen.

Im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts »[FernWP – Fern- und Prozesswärmeversorgung durch Wärmepumpen als Ersatz der Kohleverbrennung](#)« untersuchen wir die konkrete Einbindung in bestehende Fernwärmesysteme und industrielle Prozesse. Zunächst evaluieren wir hierfür verschiedene Wärmepumpenkreisläufe und Kältemittel. Ziel ist, in Zusammenarbeit mit den Fraunhofer-Instituten IEG und ISI, den Stadtwerken Cottbus, Johnson Controls, Gesmex und dem AGFW eine Großwärmepumpe für die Fernwärmeversorgung an einem Kohlekraftwerksstandort in Betrieb zu nehmen. Zusätzlich werten wir mithilfe eines Labormusters unterschiedliche Komponenten und Verschaltungen zur Effizienzsteigerung aus. Beispielhaft untersuchen wir verschiedene Industrieprozesse mithilfe einer Pinch-Analyse und bewerten die Eignung und korrekte Platzierung einer HTWP.



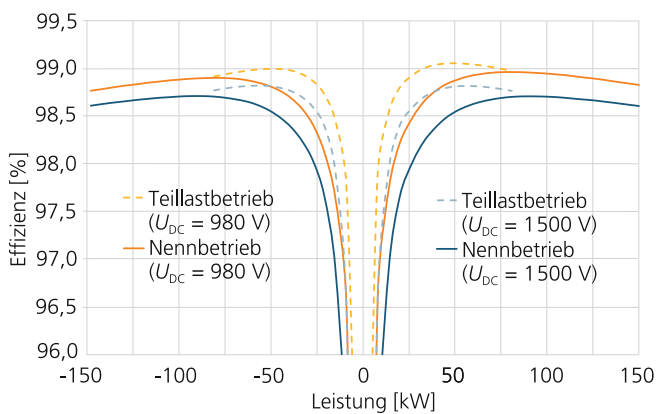
*Butan-Hochtemperatur-Wärmepumpe der Firma Johnson Controls.*

### Kontakt

Dr. Stefan Henninger  
Telefon +49 761 4588-5104  
[heatpumps@ise.fraunhofer.de](mailto:heatpumps@ise.fraunhofer.de)

# Leistungselektronik für stationäre Batteriespeichersysteme mit bis zu 1 500 V Eingangsspannung

Im Zuge der Energiewende nimmt der Anteil fluktuierender erneuerbarer Energien an der Energieversorgung zu. Die Entwicklung von Energiespeichern spielt daher eine zentrale Rolle. Das Fraunhofer ISE arbeitet im Rahmen des vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekts »HYBAT« gemeinsam mit BorgWarner AKASOL AG, HYDAC Cooling GmbH und der TU Dresden an einer kostenoptimalen, hybriden Batteriespeicherlösung für den stationären Bereich.



## Optimierung des Wechselrichterwirkungsgrads im Teillastbereich.

Dabei fokussieren wir uns auf die Hardwareentwicklung einer bidirektionalen Leistungselektronik mit einer maximalen Eingangsspannung von 1 500 V und einer nominellen Leistung von 150 kW. Bei Batteriespeichersystemen muss – im Gegensatz zu Photovoltaikwechselrichtern – die Nennleistung auch bei voller Zwischenkreisspannung bereitgestellt werden. Das

aufgebaute System soll den aktuellen Trend hin zu höheren Batteriesystemspannungen ermöglichen. Durch die erhöhte Spannung müssen die Batteriemodule und die Leistungselektronik bei gleichen Leistungen geringere Ströme leiten. Dies führt zu kleineren Systemkomponenten und geringeren thermischen Verlusten. Das System besteht aus einem Wechselrichter sowie zwei DC/DC-Stellern für das Hochleistungs- und das Hochenergiebatteriemodul. Die unterschiedlichen Batteriemodule sorgen bei unterschiedlichen Lastprofilen für eine optimale Nutzung und Alterung der Batterien.

Der Wechselrichter besteht aus hybriden ANPC-Leistungshalbleitermodulen, die eine 3-Level-Topologie aufbauen. Sie setzt sich aus vier kostengünstigen, langsam getakteten Si-IGBTs (50 Hz) und zwei schnellschaltenden (48 kHz) SiC-MOSFETs zusammen. Dies ermöglicht ein kostengünstigeres Design bei hoher Schaltfrequenz.

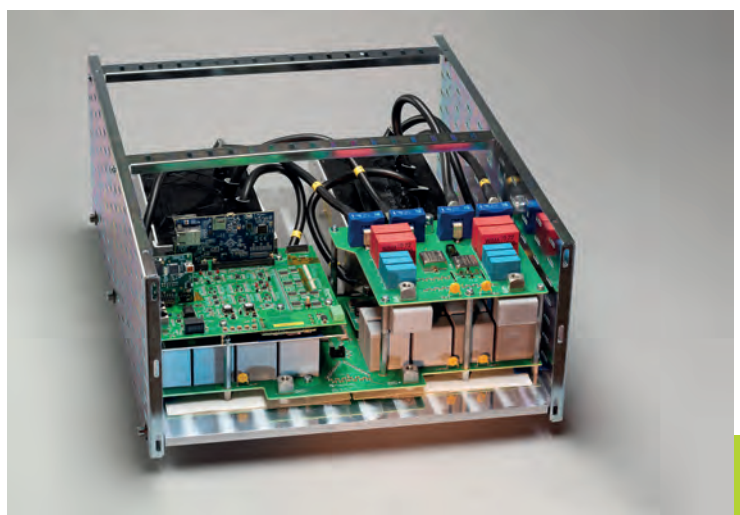
Um eine Optimierung des Teillastbereichs zu erzielen, haben wir bei der Entwicklung der Leistungselektronik sowohl den Wechselrichter als auch die DC/DC-Steller mehrstufig aufgebaut. Das bedeutet, dass zwei Brückenschaltungen jeweils parallel verschaltet sind, wobei eine davon im Teillastbereich deaktiviert werden kann. Der Teillastbereich ist in Batteriesystemen von besonderer Bedeutung, da Batterien mit steigendem Ladezustand nur geringere Ladeleistungen erlauben.

Zur Evaluierung der neu entwickelten Systemkomponenten und der Validierung der hybriden Batterieführung des Speichers haben wir im Multi-Megawatt Lab des Zentrums für Leistungselektronik und nachhaltige Netze des Fraunhofer ISE einen vollautomatischen Dauerversuchsteststand aufgebaut. An diesem evaluieren wir die Systemeigenschaften der »Hybriden Lithium-Ionen-Batteriespeicherlösung mit 1 500 V-Systemtechnik, innovativem Thermomanagement und optimierender Betriebsführung«.

## Kontakt

Robert Kragl  
Telefon +49 761 4588-2089  
pcu@ise.fraunhofer.de

*Zweiphasiger, kompakter  
DC/DC-Wandler,  
150 kW Leistung,  
48 kHz Taktfrequenz,  
Spannungsbereich  
bis 1 500 V.*



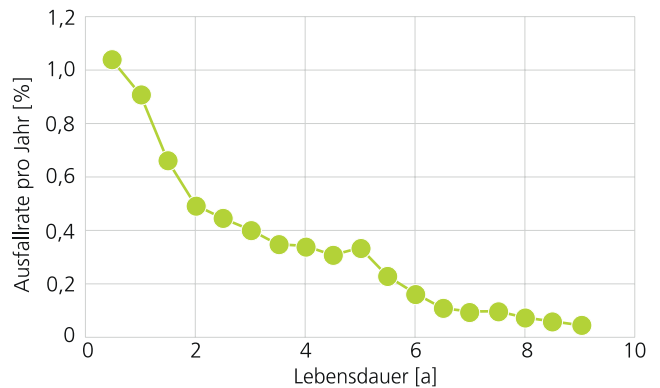


## Felddaten- und Ausfallanalyse für eine höhere Zuverlässigkeit von PV-Wechselrichtern

Stromrichter sind Schlüsselkomponenten für den Übergang von konventioneller zu erneuerbarer Energieerzeugung. Allerdings zählen sie zu den Anlagenkomponenten mit den höchsten Ausfallraten und Servicekosten. Während PV-Module für Betriebszeiten von zwanzig bis dreißig Jahren ausgelegt werden, erreichen Wechselrichter im Schnitt nur zehn bis fünfzehn Jahre.

Im Rahmen des Fraunhofer Eigenforschungsprojekts [»power-4re«](#) haben wir relevante Ausfallcharakteristika, Subkomponenten und geräteinterne Betriebsbedingungen untersucht, um Handlungsmöglichkeiten für eine verbesserte Zuverlässigkeit und Lebensdauer von Stromrichtern aufzuzeigen. Mithilfe der Analyse von Felddaten für eine String- und eine Zentralwechselrichter-Produktlinie, mit einer installierten Leistung von über 19 GW und Betriebszeiten von bis zu zehn Jahren, konnten wir Halbleitermodule und elektromechanische Schalter als Hauptausfallkomponenten identifizieren. Die Entwicklung der Ausfallraten über die Lebensdauer dieser Komponenten weist eine signifikante Frühausfallcharakteristik auf. Dies kann einerseits als Qualitätsmerkmal gewertet werden, da bekannte Alterungsmechanismen wie Anhebungen und Risse der Bonddrähte nur eine unerhebliche Rolle spielen. Andererseits legen die Ergebnisse nahe, dass gängige In-Line- oder End-of-Line-Tests in der Wechselrichterproduktion diese Frühausfälle nicht erfassen können. Ein besseres Verständnis der Fehlermechanismen und eine Anpassung der Tests können somit zu einer gesteigerten Zuverlässigkeit von Wechselrichtern beitragen.

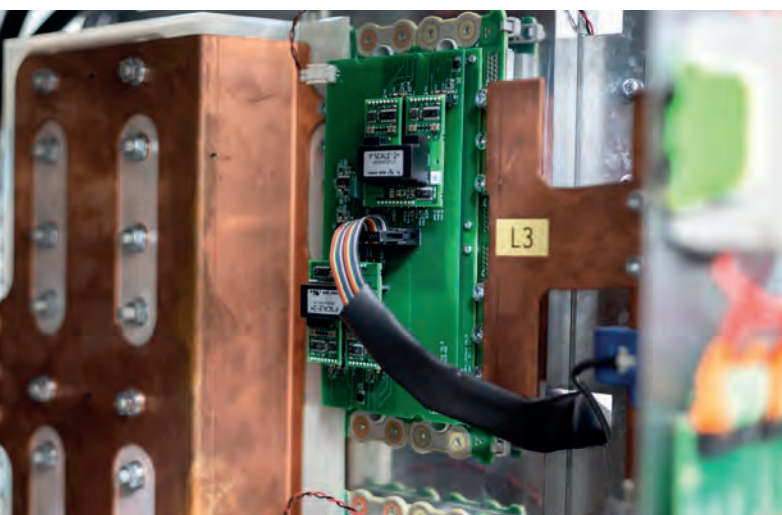
Die Ausfallraten steigen im mitteleuropäischen Klima in den Sommermonaten an, die von einer hohen absoluten Luftfeuchte geprägt sind. Zudem findet rund ein Drittel der Ausfälle während oder kurz nach dem Anlaufvorgang des Wechselrichters bei niedrigen Erzeugungsleistungen statt. Mithilfe von Temperatur- und Feuchtesensoren sowie Leistungsmessungen



*Entwicklung der jährlichen Ausfallrate einer Stringwechselrichter-Flotte über die Lebenszeit.*

haben wir das Mikroklima innerhalb mehrerer String- und Zentralwechselrichter aufgezeichnet. Wir konnten nachweisen, dass die relative Feuchte im Gehäuse zum Zeitpunkt des Anlaufs ein Maximum erreicht. Dies legt nahe, dass die Feuchte ein wesentlicher Treiber für die beobachteten Frühausfälle ist. Mögliche Fehlermechanismen bei Halbleitermodulen sind die »Dendritenbildung« aufgrund von elektrochemischer Migration sowie Verzerrungen von elektrischen Feldern an den Chiprändern durch Wassermoleküle, die zu einem Isolationsdurchschlag führen.

Anhand der gemessenen Mikroklimata definieren wir zunächst typische Belastungsräume für PV-Wechselrichter in Mitteleuropa. Daraus leiten wir im nächsten Schritt einen multimodalen Stresstest ab, der feuchteinduzierte Fehlermechanismen beschleunigt und somit die Überprüfung von zukünftigen und zuverlässigen Stromrichtern ermöglicht.



*Halbleiter- und Treibermodul eines Zentralwechselrichters.*

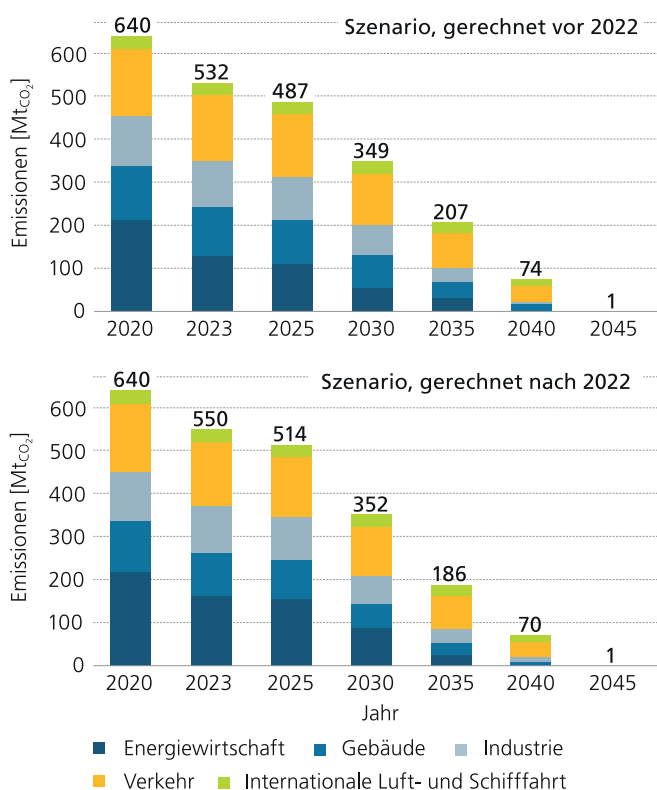
### Kontakt

Felix Kulenkampff  
Telefon +49 761 4588-2124  
hpe@ise.fraunhofer.de



## Transformationspfade für die Energiewende unter veränderten Rahmenbedingungen

Die Energiewelt und der Blick auf die Energiewende haben sich im Jahr 2021 und 2022 verändert: Klimaneutralität 2045, der Ukraine-Krieg, die damit verbundenen Energiepreiserhöhungen und die immer deutlich werdenden Klimafolgen beeinflussen die energiepolitische Diskussion dramatisch – und somit die möglichen Transformationspfade des deutschen und europäischen Energiesystems in Richtung Klimaneutralität. Wie kann es nun weitergehen? Wie müssen sich die Transformationspfade an diese Veränderungen anpassen?



*Energiebedingte CO<sub>2</sub>-Emissionen als Ergebnis der Modellierung von Transformationspfaden für Deutschland mit REMod.*

### Kontakt

Dr. Christoph Kost  
Telefon +49 761 4588-5750  
energiesystemanalyse@ise.fraunhofer.de

Mit seiner energiewirtschaftlichen und energiesystemanalytischen Breite über alle Projektpartner sowie seinem interdisziplinären Charakter ermöglicht das [»Kopernikus-Ariadne-Projekt«](#) wie kein anderes Projekt, die dramatischen Veränderungen der letzten beiden Jahre zu analysieren und Lösungsstrategien zu entwickeln.

Im vom Bundesministerium für Bildung Forschung (BMBF) geförderten »Kopernikus-Ariadne-Projekt« haben Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer ISE die Analysemethoden für mögliche Transformationspfade weiterentwickelt. Im Fokus der Arbeiten stehen hierbei die Entwicklungen am Energiesystemmodell REMod, welches das Energiesystem von Deutschland abbildet und alle Technologien sowie alle Nachfragen und Kosten erfasst.

Ganz konkret wurden im letzten Jahr die Versorgungssicherheit und die Veränderung der Sicherheitslage analysiert. So analysieren wir am Fraunhofer ISE im Rahmen des »Kopernikus-Ariadne-Projekts«, wie auf die Energiepreisdynamiken durch klimaneutralitätskonforme Pfade reagiert werden kann, indem z. B. verstärkt Erdgas eingespart und durch erneuerbare Technologien ersetzt wird. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Einsparung von Erdgas nur mit einem höheren Verbrauch von Kohle und Öl abgedeckt werden kann. Dies würde allerdings in der Konsequenz eine etwas schwächere Reduktion der CO<sub>2</sub>-Emissionen in den kommenden fünf Jahren bedeuten. Gleichzeitig ergeben sich hohe Zubaumengen für erneuerbare Energien, die um ca. 5 % bis 8 % über den aktuellen, sehr ambitionierten Plänen liegen. Daraus lässt sich schließen, dass die aktuelle Situation die Unternehmen verstärkt dazu zwingt, kurzfristige konkrete CO<sub>2</sub>-Einsparungsstrategien vor allem durch die Nutzung von grünem Strom zu entwickeln. Die Mengengerüste aus der Modellierung von REMod können unseren Kunden hierbei wichtige Anhaltspunkte liefern und maßgeblich für eigene Ziele und Anstrengungen sein.

Eine weitere Neuerung in den Analysen mit REMod ist, dass das Modell so weiterentwickelt wurde, dass es die Auswirkungen auf die Netzinfrastruktur sowie auf einzelne Bundesländer berücksichtigen kann. Dadurch ist es möglich, die Rolle und Beiträge bestimmter Technologien in einzelnen Regionen genauer zu spezifizieren, woraus wir Entwicklungen und Maßnahmen für die einzelnen Bundesländer ableiten.

## Bidirektionales Laden – das volle Potenzial der Elektromobilität entfalten

Eine Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung des Verkehrssektors ist die Elektromobilität – ein Forschungsfeld, mit dem wir uns am Fraunhofer ISE seit über einem Jahrzehnt beschäftigen. Es umfasst effiziente Leistungselektronik, Batterietechnologien, Kommunikationsschnittstellen und die Netzintegration von Elektrofahrzeugen ebenso wie innovative Geschäftsmodelle und Betriebsführungskonzepte, die wir in Feldtests evaluieren. Nach ersten Projekten mit prototypischen Implementierungen ist die Technik heute marktreif und großskalige Anwendungen mit Fahrzeugflotten stehen nun im Fokus. Einen wichtigen Meilenstein konnten wir mit dem Forschungsprojekt [»LamA – Laden am Arbeitsplatz«](#) erreichen.

Im Rahmen des Projekts errichtete die Fraunhofer-Gesellschaft gemeinsam mit Partnern an 36 Fraunhofer-Instituten bundesweit insgesamt 480 Ladepunkte – Freiburg ist einer der drei Leuchtturmstandorte. Mit einem abschließenden Praxistest haben das Fraunhofer ISE und der lokale Netzbetreiber bnNETZE nachgewiesen, dass eine intelligente Steuerung im Netzleitsystem das Verteilnetz vor einer Überlastung schützt, wenn viele Nutzer gleichzeitig ihr Fahrzeug laden möchten.

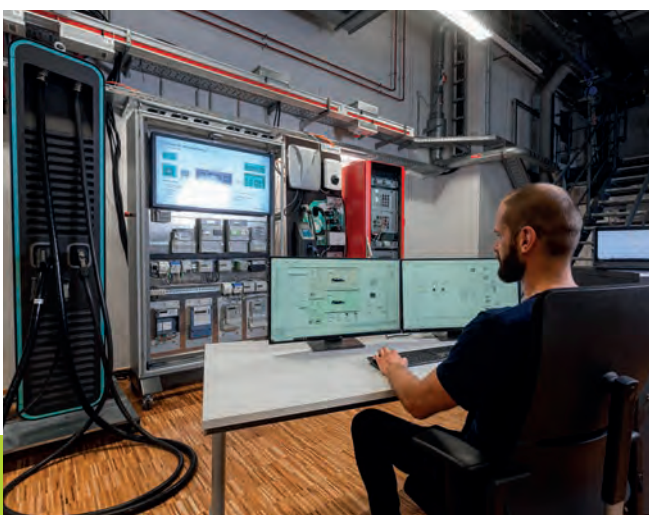
Im Rahmen des Folgeprojekts »LamA²« widmen sich die Forschenden nun einem nächsten Schritt der Elektromobilität, bei dem rückspeisefähige Elektrofahrzeuge zu mobilen Batteriespeichern für das Stromnetz werden sollen. Neben regulatorischen Fragestellungen ist die Interoperabilität ein weites Forschungsfeld. Wenn Elektrofahrzeuge netzdienlich in das Smart Grid einspeisen, müssen umfangreiche Informationen zwischen unterschiedlichen Akteuren ausgetauscht werden. Im [Digital Grid Lab](#) des Fraunhofer ISE haben wir einen Hardware-in-the-Loop-Prüfstand für bidirektionale Ladeinfrastruktur aufgebaut. Mithilfe digitaler Zwillinge der Elektrofahrzeuge und unserer Laborleitwarte können wir die Interoperabilität vom



*Beim Praxistest zum Abschluss des Projekts »LamA – Laden am Arbeitsplatz« hat das Fraunhofer ISE eine intelligente Steuerung von Ladesäulen getestet.*

Verteilnetzbetreiber bis zur Ladestation erproben. Hierbei entwickeln und erproben wir neueste Kommunikationsprotokolle wie ISO 15118-20, OCPP 2.0.1 mit aktuellen Erweiterungen sowie EEBus.

Darüber hinaus haben wir im Rahmen eines Entwicklungsauftrags für den Übertragungsnetzbetreiber TransnetBW zwei Anwendungsfälle für das bidirektionale Laden im Feldtest erprobt. Beim Laden wird Strom aus dem Netz genutzt, wenn ein hoher Anteil an erneuerbaren Energien (EE) zur Verfügung steht. Dieser geladene EE-Strom kann bei Bedarf später wieder für das lokale Firmennetz oder andere Fahrzeuge bereitgestellt werden. Durch das Rückspeisen aus den Fahrzeugen können aktiv Lastspitzen des Anschlussnehmers reduziert und somit Netzentgelte gespart werden. Möglich macht dies ein vom Fraunhofer ISE entwickelter prädiktiver Optimierungsalgorithmus, der Ladefahrpläne als Cloud-Service bereitstellt.



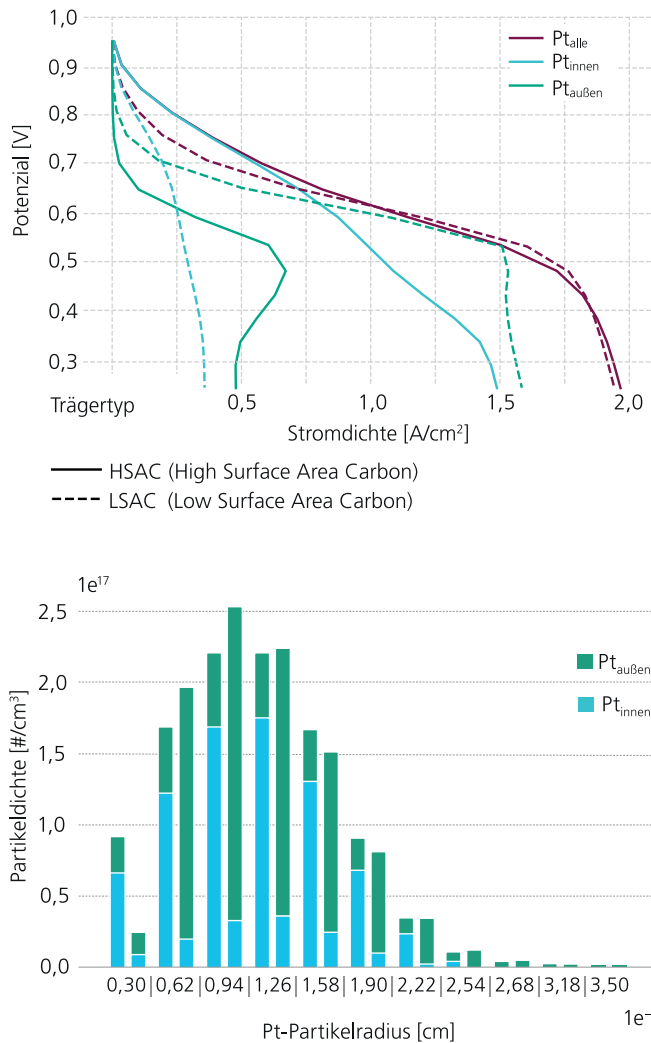
*Hardware-in-the-Loop-Tests für das bidirektionale Laden im Digital Grid Lab.*

### Kontakt

Marco Mittelsdorf  
Telefon +49 761 4588-5446  
[digital-grid-lab@ise.fraunhofer.de](mailto:digital-grid-lab@ise.fraunhofer.de)



## Leistung und Alterung der Membranelektroden- einheit von mobilen Brennstoffzellen



*Simulation des Einflusses der Kohlenstoffstruktur auf die Platinverteilung und der Polarisationskurve am Beispiel zweier Platin-Kohlenstoff-Katalysatoren.*

Eine der großen Herausforderungen für die Wettbewerbsfähigkeit der Brennstoffzellentechnologie ist die Reduktion von teurem Platin als Katalysator. Damit eine Verringerung der Platinbeladung weder die Zelleistung noch die Langzeitstabilität beeinträchtigt, bedarf es einer Optimierung der Elektrodenstruktur.

In den Projekten »FC-CAT« und »FC-RAT«, die vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert werden, entwickeln wir Modelle, die den Zusammenhang der Interaktionen zwischen Leistung und Alterung auf der einen Seite sowie Materialien und Struktur auf der anderen Seite abbilden. Die Katalysatorschicht besteht aus Ansammlungen von mit Platin dekorierten Kohlenstoffpartikeln, die mittels eines Ionomer-Netzwerks zusammengehalten und protonisch kontaktiert werden. Dabei ist nicht jeder Platinpartikel in Kontakt mit Ionomer und je nach Wassergehalt der Elektrode inaktiv für die elektrochemische Reaktion. Der direkte Kontakt des Ionomers mit dem Platinpartikel verursacht jedoch eine ungewollte Teilblockade aktiver Zentren durch die Sulphonsäuregruppen der Ionomer-Seitenketten. Folglich sollte der Platinpartikel auf Distanz von wenigen Nanometern zu dem Ionomer bleiben, sodass in Verbindung mit Wasser eine hohe Protonenkonzentration an der Platinoberfläche gewährleistet ist, aber keine Vergiftung entsteht. Die Positionierung der Platin-Nanopartikel auf dem Kohlenstoffsupport ist somit von entscheidender Bedeutung bei der Reduktion der Platinbeladung.

Unser Modell basiert auf einer Partikelgrößenverteilung (PSD) des Platins (Pt). Es wird zwischen Partikeln auf der Supportoberfläche, die in Kontakt mit Ionomer stehen können, und Partikeln in den Mesoporen des Supports, die unzugänglich für das Ionomer sind, unterschieden. Das Modell koppelt diese Strukturinformationen mit den physikalisch-elektrochemischen Prozessen, die über Kinetik und Stofftransportgleichungen die Stromproduktion, aber auch Degradationseffekte, beschreiben. Damit sind wir in der Lage, den Einfluss der Platinpositionierung bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen auf die Zelleistung und Alterung zu simulieren. Die Abbildungen zeigen eine simulierte Polarisationskurve zusammen mit dem Anteil der Stromproduktion zweier Platinklassifizierungen (oben) sowie die für die Simulation verwendete PSD (unten).

### Kontakt

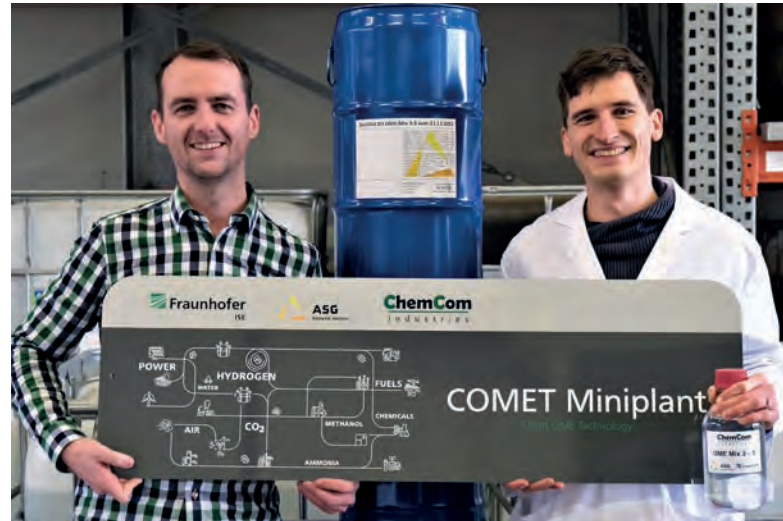
Dr. Dietmar Gerteisen  
Telefon +49 761 4588-5205  
h2fc.systems@ise.fraunhofer.de



## Synthetische Kraftstoffe für eine nachhaltige Mobilität – die $\pi$ -COMET®-Technologie des Fraunhofer ISE

Während bei Pkws der Trend zu Elektrofahrzeugen geht, werden im Schwerlast-, Schiffs- und Flugverkehr sowie bei Off-Road-Maschinen für den Bergbau und die Landwirtschaft weiterhin vorwiegend Flüssigkraftstoffe zum Einsatz kommen. Tatsächlich belegt die vom Nationalen Wasserstoffrat in Auftrag gegebene [»Metastudie Wasserstoff – Auswertung von Energiesystemstudien«](#), dass die Energiewende nur mit einem globalen Handel von  $H_2$  und PtX-Produkten gelingen kann. Oxymethylenether (OME) können als E-Fuels die lokalen Ruß- und Stickoxid-Emissionen von Dieselmotoren deutlich senken. Durch nachhaltige Produktion von OME in einer PtX-Wertschöpfungskette ist es möglich, die THG-Emissionen im Vergleich zu Dieselmotoren um mehr als 86 % zu reduzieren – von 209 g ( $CO_{2eq}$ )  $km^{-1}$  Diesel auf 29 g ( $CO_{2eq}$ )  $km^{-1}$  OME. In einem kohlenstoffneutralen Szenario mit OME als Ersatz für fossilen Dieselmotoren ist die Reduktion von  $CO_2$ -Äquivalenten – basierend auf unserer Ökobilanz – auf bis zu 95 % steigerbar. Es besteht hiermit also ein enormes Potenzial, die Emissionen des Verkehrssektors zu senken.

Eine Hürde für die großindustrielle Herstellung von OME war bislang das Wassermanagement im Syntheseprozess. Im Projekt [» \$\pi\$ -COMET®- Process Intensified Clean OME Technology«](#) hat das Fraunhofer ISE mit seinen Industriepartnern ChemCom Industries B.V. und ASG Analytik-Service AG eine innovative technische Lösung entwickelt, die einen OME-Produktionsprozess im Industriemaßstab ermöglicht. Das zum Patent angemeldete  $\pi$ -COMET®-Konzept konzentriert sich auf die Entfernung des Wassers nach der OME-Synthese in einer Reaktivdestillationskolonne und löst so das Problem des Wassermanagements. Auf die bisher genutzte Extraktion und Adsorption kann dabei ebenso verzichtet werden wie auf Membrantechniken, die einen Scale-up verzögern würden. Durch die Strukturierung im Prozess und die Betriebsbedingungen der Reaktivdestillationskolonne sind deutlich höhere



Wissenschaftler Franz Mantei vom Fraunhofer ISE (rechts) und Christian Schwarz von der ASG Analytik Services AG (links) präsentieren die Power-to-OME-Wertschöpfungskette.

Umsätze und Selektivitäten in der OME-Synthese möglich, was zu einer Effizienzsteigerung des Gesamtprozesses führt. Nach dem Proof-of-Concept des Verfahrens demonstrierte das Projektteam den integrierten Prozess erfolgreich im Technikumsmaßstab. Dafür kam eine neu entwickelte  $\pi$ -COMET®-Miniplant zum Einsatz, die mit einer industriellen Pilotanlage für die Reaktivdestillation und Produktreinigung gekoppelt war. Das OME-Endprodukt erreichte eine normgerechte Qualität. Das Fraunhofer ISE arbeitet derzeit gemeinsam mit den Projektpartnern am Engineering der ersten europäischen OME-Produktionsanlage im niederländischen Delfzijl im Maßstab von ca. 1 t/h auf Basis des  $\pi$ -COMET®-Prozesskonzepts. Die Anlage soll 2025 in Betrieb genommen werden und als Referenzanlage für die weitere Hochskalierung dienen.



Hochreines OME BlueGrade®  
gemäß der Vornorm  
DIN/ITS 51699.

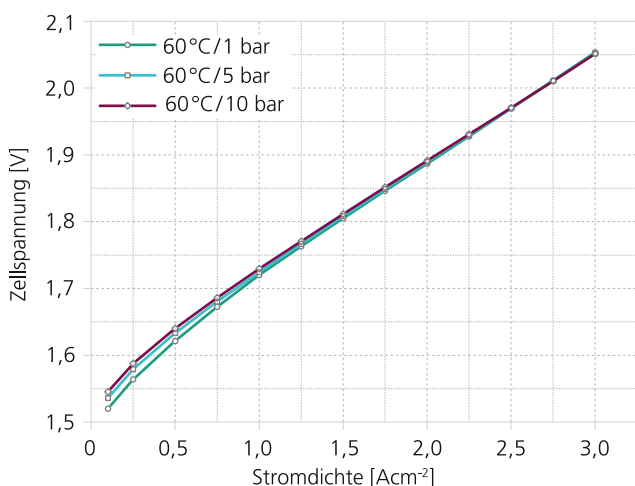
### Kontakt

Dr. Ouda Salem  
Telefon +49 761 4588-5335  
h2fc.thermoprocess@ise.fraunhofer.de

## Fortschrittliche Zellkonzepte für die großskalige Massenproduktion von PEM-Elektrolyseuren

Um in Zukunft am Standort Deutschland konkurrenzfähige Stacks für die PEM-Elektrolyse in hoher Stückzahl produzieren zu können, sind Innovationsschritte sowohl im Design als auch in der Herstellung erforderlich. Am Fraunhofer ISE beschäftigen wir uns intensiv mit verschiedenen konstruktiven und produktionstechnischen Fragestellungen zur PEM-Elektrolyse.

So konnten wir im Projekt »CINES – Fraunhofer Cluster of Excellence Integrated Energy Systems« ein fortschrittliches Zell- und Stackdesign entwickeln, das die großskalige Massenproduktion von PEM-Elektrolyseuren adressiert. Auf der Grundlage bisheriger Entwicklungsarbeiten haben wir einen neuartigen Halbzellenverbund (HZV) als wesentliches Bauteil eines Stacks für die PEM-Elektrolyse konzeptioniert und mit einer Zellfläche von 150 cm<sup>2</sup> prototypisch hergestellt. Wir konnten diesen im Rahmen eines Proof-of-Concept mit einer Stromstärke bis zu 450 A betreiben.



Zellspannung über Stromdichte bei 60 °C für H<sub>2</sub>-Druck von 1 bar, 5 bar und 10 bar.

Der HZV vereint die Funktionalität der Einzelkomponenten konventioneller Designs wie Rahmenteil, Dichtelement, Kanalstrukturen für die Medienversorgung und poröse Transportschicht in nur einem Bauteil – jedoch ohne Verwendung eines zusätzlichen Rahmenteils.

Die Vorteile, die durch den Einsatz des vorgestellten HZV entstehen, sind vielfältig: Sie liegen in der Reduktion von Material- und Herstellkosten, einer Verringerung der Bauteilanzahl – und somit einer vereinfachten Montage – und bieten zudem neue Möglichkeiten wie Flächenskalierung, automatisierte Herstellverfahren sowie die Qualitätsprüfung eines HZV vor der Montage.

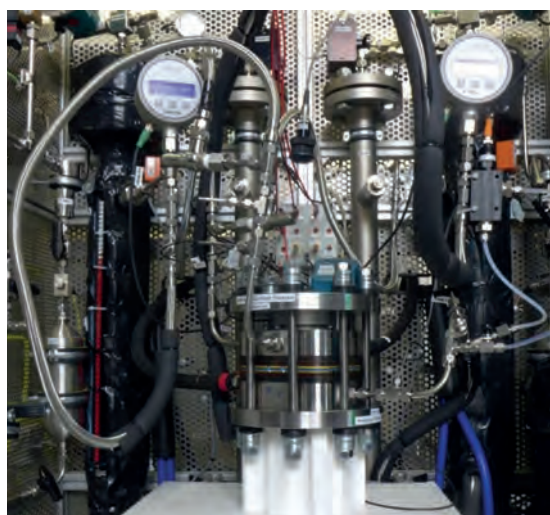
Nach dem ersten Projektjahr konnte bereits eine Vorauswahl bevorzugter Designvarianten auf Basis von Tests mit einer Zellfläche von 4 cm<sup>2</sup> erfolgen. Darauf aufbauend haben wir ein Design für einen HZV mit 25 cm<sup>2</sup> entworfen, optimiert, gefertigt und erfolgreich getestet. Hier lag der Schwerpunkt auf einer reproduzierbaren Qualität in der Herstellung und einer zuverlässigen hohen elektrochemischen Performance. Letztendlich konnten wir die Fläche auf 150 cm<sup>2</sup> hochskalieren. Der Proof-of-Concept wurde erfolgreich durch eine elektrochemische Charakterisierung an Einzelzellen und Mehrzellen abgeschlossen. Die Messergebnisse zeigen, dass der HZV im Betrieb in der Lage ist, Druck- und Temperaturwechsellasten auf der Anode bzw. Kathode bis 10 bar und 80 °C ohne nennenswerte Performance-Einbußen zu gewährleisten.

Aufgrund dieser positiven Ergebnisse wurde das entwickelte Design- und Herstellverfahren zum Patent angemeldet. Aktuell bearbeiten wir die Skalierung auf größere Zellflächen bis 600 cm<sup>2</sup> mit höherem Wasserstoffgasdruck, um eine industriell relevante Ausführung bei vergleichbaren Leistungsdichten wie im Proof-of-Concept zu erreichen.

### Kontakt

Kolja Bromberger  
Telefon +49 761 4588-5574  
h2fc.electrolysis@ise.fraunhofer.de

*Im Teststand montierte PEM-Elektrolysezelle während der elektrochemischen Charakterisierung.*



## Sicherheitsuntersuchungen für Batterien und Entwicklung von Lösungen gegen das thermische Durchgehen

Ein wesentliches Merkmal von Lithium-Ionen-Zellen ist ihre hohe Energiedichte. Diese birgt unter ungünstigen Bedingungen das Risiko des »thermischen Durchgehens«. Als Risikofaktoren sind besonders intrinsische Zelldefekte, Degradation und Überhitzung sowie ein Versagen bzw. eine falsche Auslegung des Batteriemanagements zu nennen. In der Folge kann es kurzzeitig zur Freisetzung sehr großer Wärmemengen und heißer, zum Teil toxischer, Gase kommen. Die so entstehende Druckwelle kann zerstörerisch auf die Nachbarzellen einwirken und auch diese in kritische Zustände versetzen. Man spricht dann von der sogenannten »Propagation«.

In dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »[PLÖPSS](#)« forschen wir am Fraunhofer ISE zur Sicherheit von Lithium-Ionen-Batterien und arbeiten an propagationshemmenden Lösungen. Unser Ziel ist, propagationshemmende Materialien, Flammenschutzkomponenten und Gehäuse zu entwickeln und zu validieren. Im Rahmen des Projekts haben wir einen hermetisch geschlossenen Druckkessel mit einem Volumen von ca. 500 Litern, eine sogenannte Propagationskugel, entwickelt. Der Prüfstand ist für Spitzentemperaturen bis 1000°C und einen maximalen Druck von 40 bar spezifiziert. Die elektrische Versorgung der Prüflinge und den Datenaustausch mit der Messtechnik realisieren wir anhand spezieller Durchführungen. Die Einbaumöglichkeiten zahlreicher Temperatur- und Drucksensoren sowie die Inertisierung ermöglichen eine genaue Abbildung der Prozesse. Dauerhafte Video- und Infrarotaufnahmen runden die Ausstattung des Prüfstands ab.

Im [Zentrum für elektrische Energiespeicher](#) testen wir darüber hinaus sowohl nach Normen und Standards als auch nach Kundenspezifikationen. Besonders die Validierung von Sicherheitseinrichtungen und Maßnahmen zum Verhindern der Feuerausbreitung sind dabei Schwerpunkte unserer Arbeit. Dazu verfügen wir über zahlreiche Bunker, die mit der neuesten Messtechnik zur Bestimmung von Temperaturen und Gaszusammensetzungen ausgestattet sind. Ergänzt wird das Labor durch eine Gasreinigung, die eine sichere und emissionsfreie Durchführung erlaubt.

Auch Pressemeldungen zu Bränden von Batteriespeichern und Elektrofahrzeugen zeigen, dass weiterhin Forschungsbedarf besteht. Konkret müssen durch konstruktive Maßnahmen die Wahrscheinlichkeit des thermischen Durchgehens und der Propagation verringert, die sicherheitskritischen Prozesse verlangsamt und – im Havariefall – ein Austreten aus dem Systemgehäuse verhindert werden. Hierzu können wir in unserer Propagationskugel die Ausbreitungsvorgänge zwischen den Zellen nachstellen und neue, die Ausbreitung verlangsamende oder verhindernde Materialien qualifizieren. Diese Untersuchungen sind auch auf neue Zelltechnologien übertragbar und können wesentlich dazu beitragen, die Sicherheit von Batteriespeichern maßgeblich zu erhöhen.

*Im standardisierten Test wird eine Batteriezelle stark gequetscht, um einen Unfall nachzustellen.*



*CAD-Zeichnung der Propagationskugel.*



### Kontakt

Stephan Lux  
Telefon +49 761 4588-5419  
[batteries.system@ise.fraunhofer.de](mailto:batteries.system@ise.fraunhofer.de)



## Mehr Nachhaltigkeit für Batteriezellen und -konzepte entlang der gesamten Wertschöpfungskette

Batteriespeicher werden eine tragende Rolle im künftigen Energiesystem spielen. Umso wichtiger ist es, bestehende Herstellungsprozesse und Materialien für Batterien auf ihre Nachhaltigkeit hin zu untersuchen und kontinuierlich zu verbessern. Am Fraunhofer ISE beschäftigen wir uns mit dieser Fragestellung und haben im Rahmen aktueller Forschungsprojekte besonders zwei Aspekte fokussiert: Zum einen versuchen wir, im etablierten Prozess der Lithium-Ionen-Batterieherstellung durch neue siliciumbasierte Materialien beizutragen. Zum anderen entwickeln wir, insbesondere für den stationären Einsatz, neue Batteriechemien und Zellarchitekturen.

Seit Januar 2022 arbeiten wir im Projekt »[SICOM-LIB](#)« im Auftrag unseres Industriepartners, der Duisburger Beteiligungsholding PCC SE, an der Herstellung von Silicium-Kohlenstoff-Verbundstoffen in Anoden für Lithium-Ionen-Batterien. Silicium besitzt eine um ein Vielfaches höhere spezifische Kapazität als das üblicherweise verwendete Graphit und kann die Energiedichte von Lithium-Ionen-Batterien erheblich erhöhen. Es ermöglicht daher eine Reduktion des Materialeinsatzes bei der Anodenherstellung. Das von uns verwendete Silicium stellt die PCC nachhaltig und klimafreundlich mit grünem Strom her. Die Silicium-Kohlenstoff-Verbundstoffe sind so konzipiert, dass sie als Drop-in-Ersatz sukzessive in bestehenden Produktionslinien eingesetzt werden können. Im Rahmen des Projekts soll eine FuE-Pilotlinie für die Herstellung der Silicium-Kohlenstoff-Verbundstoffe aufgebaut werden, um auch die Skalierbarkeit des Herstellungsprozesses zu untersuchen.

Im dem vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Verbundvorhaben »[INFAB](#)« beschäftigen wir uns mit nachhaltigen Batteriekonzepten für die stationäre Anwendung. Gemeinsam mit unseren Industriepartnern Helmut Hechinger GmbH & Co. KG und

acp systems AG sowie der Universität Stuttgart entwickeln wir eine zinkbasierte Zellchemie mit geeignetem Herstellungsverfahren, einer geeigneten Batteriezellarchitektur sowie dazu passende Batterie- und Energiemanagementsysteme. Ergänzend zur Entwicklung der Zellarchitektur ist der Aufbau und die Inbetriebnahme einer Pilotfertigungslinie für entsprechende Batteriezellen geplant.

Die angestrebte, zinkbasierte Zellchemie mit wässrigem Elektrolyt eröffnet große Potenziale hinsichtlich einer sicheren, nachhaltigen, hochverfügbaren und kostengünstigen Batterietechnologie. Der Elektrolyt bietet dabei intrinsische Sicherheit und Zink stellt einen hochverfügbaren Rohstoff mit etabliertem Recyclingkreislauf dar. Außerdem haben wir im Rahmen des Projekts eine neuartige Elektrodenstruktur basierend auf Aktivkohle, Industrieruß (Carbon Black) und Binderpolymeren entwickelt, die damit unkritische und ebenfalls hochverfügbare Rohstoffe nutzt. Die Herstellung dieser Elektrodenstruktur verzichtet auf die Verwendung gesundheitsschädlicher Lösungsmittel sowie aufwendiger Trocknungsprozesse. Das Elektrodenherstellungsverfahren bietet zudem eine hohe Flexibilität in der gezielten Auslegung der Elektroden Eigenschaften und kann gegebenenfalls auch für andere Batteriekonzepte eingesetzt werden. Im Rahmen des Projekts untersuchen wir außerdem die Nutzungsmöglichkeit von Recyclingmaterial, insbesondere im Bereich der Kohlenstoffe oder des Batteriegehäuses.

*Elektrodengranulat als Vorstufe zur Herstellung lösemittelfreier Elektrodenstrukturen im Rahmen der Batteriezellentwicklung im Forschungsprojekt »INFAB« (Materialprobe) und skalierbare Elektrodenstruktur mit einstellbaren Eigenschaften hinsichtlich Porosität, Elektrodendicke und -form.*

### Kontakt

Dr. Daniel Biro  
Telefon +49 761 4588-5246  
[batteries.cell@ise.fraunhofer.de](mailto:batteries.cell@ise.fraunhofer.de)





## Integration von Großspeichern in Energiesysteme

Mit wachsendem Anteil erneuerbarer Energiequellen an der Stromversorgung steigen die Fluktuationen in der Erzeugung elektrischer Energie. Eine wesentliche Herausforderung ist, diese mit den Energiebedarfsprofilen der Verbraucher in Einklang zu bringen. Batteriespeicher stellen dabei ein zentrales Element für den nötigen Umbau des elektrischen Energiesystems dar, da sie sowohl einen technischen als auch einen wirtschaftlichen Ausgleich der Schwankungen ermöglichen. Ihre erfolgreiche Integration in die elektrische Energieversorgung ist einer der Forschungsschwerpunkte am Fraunhofer ISE.

Im Rahmen des vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg geförderten Forschungsvorhabens »Haid-Power« realisieren wir in Kooperation mit dem Fraunhofer EMI die Einbettung eines Großspeichers in das neue Batterieforschungszentrum im Freiburger Industriegebiet Haid. Dabei sorgt ein Energiemanagementsystem (EMS) dafür, dass überschüssiger Strom aus einer Solaranlage in der Batterie zwischengespeichert und anschließend genau dann wieder abgegeben wird, wenn die Sonneneinstrahlung nicht ausreicht. Das EMS ist zudem mit einem Labormanagementsystem gekoppelt und kann sicherstellen, dass die Anschlussleistung auch bei simultanem Betrieb von Hochleistungsprüfgeräten und anderen Laboranlagen gewährleistet bleibt.

Neben der Sicherheit und Zuverlässigkeit ist die Performance – zusammengesetzt aus Effizienz, Effektivität und Lebensdauer – eine ausschlaggebende Größe für die Wirtschaftlichkeit beim Einsatz von Energiespeichern. Während es für kleinere Batteriesysteme im Heimspeicherbereich bereits Normen für Sicherheit und Regeln für die Ermittlung der Effizienz gibt, fehlen solche Richtlinien für den Einsatz größerer Batteriespeichersysteme in Gewerbe und Industrie (Commercial & Industrial (C&I)-Speichersysteme). Vor diesem Hintergrund ist es Ziel der Projektpartner DKE, Fraunhofer ISE, StoREgio und VDE,



*PV-Anlage auf dem Dach des neuen Zentrums für elektrische Energiespeicher im Freiburger Industriegebiet Haid.*

im vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderten Projekt »AnLeiBat« Richtlinien zur Leistungsbewertung von C&I-Speichersystemen zu erarbeiten. Sie sollen für Anbieter und Nachfrager gleichermaßen eine transparente Basis schaffen, auf der Prüfungen und Qualitätssicherung von Batteriespeichersystemen sowie vergleichende, zuverlässige Bewertungen erfolgen können. Der Arbeitsschwerpunkt des Fraunhofer ISE ist dabei, das langjährig gesammelte Wissen im Bereich der Batteriespeicher – von der Zelle über das System bis hin zur Anwendung – unter der Berücksichtigung von Performance-Kriterien in das Projekt einzubringen.

Durch diese beiden und viele weitere Projekte bauen wir die theoretischen und praktischen Kompetenzen im Bereich Großspeicher stetig aus und leisten durch die Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen und Industrieunternehmen einen entscheidenden Beitrag zu ihrer erfolgreichen Integration in das Energieversorgungssystem.



*Manuelle Vermessung eines Batteriespeichers am Fraunhofer ISE.*

### Kontakt

Dr. Nils Reiners  
Telefon +49 761 4588-5281  
[batteries.application@ise.fraunhofer.de](mailto:batteries.application@ise.fraunhofer.de)

# Veranstaltungen 2023 mit Beteiligung des Fraunhofer ISE

## Januar

|                               |                                         |                     |
|-------------------------------|-----------------------------------------|---------------------|
| Abu Dhabi Sustainability Week | Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate | 19. – 25.01.2022    |
| Batterieforum Deutschland     | Berlin                                  | 18. – 20.01.2023    |
| SPIE Photonics West           | San Francisco, USA                      | 31.01. – 02.02.2023 |

## Februar

|                     |                                      |                     |
|---------------------|--------------------------------------|---------------------|
| PVInMotion          | 's-Hertogenbosch, Niederlande/hybrid | 15. – 17.02.2023    |
| World Hydrogen MENA | Dubai, Vereinigte Arabische Emirate  | 27.02. – 02.03.2023 |
| 38. PV-Symposium    | Kloster Banz, Bad Staffelstein       | 28.02. – 02.03.2023 |

## März

|                               |              |                  |
|-------------------------------|--------------|------------------|
| International Battery Seminar | Orlando, USA | 20. – 23.03.2023 |
| Volta-X                       | Stuttgart    | 28. – 30.03.2023 |

## April

|                  |                           |                  |
|------------------|---------------------------|------------------|
| Silicon PV       | Delft, Niederlande/hybrid | 11. – 13.04.2023 |
| AgriVoltaics2023 | Daegu, Südkorea           | 12. – 14.04.2023 |
| Hannover Messe   | Hannover                  | 17. – 21.04.2023 |
| BAU              | München                   | 17. – 22.04.2023 |
| OWPT Conference  | Yokohama, Japan           | 18. – 21.04.2023 |

## Mai

|                                            |                       |                                      |
|--------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| Berliner ENERGIEtage                       | online<br>Berlin      | 03. – 05.05.2023<br>22. – 23.05.2023 |
| Metallization and Interconnection Workshop | Neuchâtel, Schweiz    | 08. – 09.05.2023                     |
| 33. Solarthermie-Symposium                 | Bad Staffelstein      | 09. – 11.05.2023                     |
| PCIM                                       | Nürnberg              | 09. – 11.05.2023                     |
| IEA Heat Pump Conference                   | Chicago, USA          | 15. – 18.05.2023                     |
| e-world Energy & Water                     | Essen                 | 23. – 25.05.2023                     |
| The Battery Show Europe                    | Stuttgart             | 23. – 25.05.2023                     |
| SNEC PV Power Expo                         | Shanghai, China       | 24. – 26.05.2023                     |
| EMRS Spring Meeting                        | Straßburg, Frankreich | 29.05. – 02.06.2023                  |

## Juni

|                                          |                       |                  |
|------------------------------------------|-----------------------|------------------|
| tandemPV Workshop                        | Chambery, Frankreich  | 06. – 08.06.2023 |
| IEEE Photovoltaic Specialists Conference | San Juan, Puerto Rico | 11. – 16.06.2023 |
| HOPV23                                   | London, England       | 12. – 14.06.2023 |
| International Energy Workshop            | Golden, Colorado, USA | 13. – 15.06.2023 |
| Intersolar / The Smarter E               | München               | 14. – 16.06.2023 |
| LASER World of Photonics                 | München               | 27. – 30.06.2023 |

## September

|                                                   |                    |                  |
|---------------------------------------------------|--------------------|------------------|
| IAA Mobility                                      | München            | 05. – 10.09.2023 |
| EUMETSAT Meteorological Satellite Conference 2023 | Malmö, Schweden    | 11. – 15.09.2023 |
| hy-fcell                                          | Stuttgart          | 13. – 14.09.2023 |
| CISBAT 23                                         | Lausanne, Schweiz  | 13. – 15.09.2023 |
| PSCO-23                                           | Oxford, England    | 18. – 20.09.2023 |
| EU PVSEC                                          | Lissabon, Portugal | 18. – 22.09.2022 |
| NUFAM Nutzfahrzeuge                               | Karlsruhe          | 21. – 24.09.2023 |

## Oktober

|                                   |                    |                  |
|-----------------------------------|--------------------|------------------|
| SolarPACES 2023                   | Sydney, Australien | 10. – 13.10.2023 |
| World Hydrogen Energy Summit 2023 | Neu-Delhi, Indien  | 16. – 17.10.2023 |
| Cemove360 Europe                  | München            | 17.10.2023       |
| European Heat Pump Summit         | Nürnberg           | 24. – 25.10.2023 |

## November

|                                            |                 |                     |
|--------------------------------------------|-----------------|---------------------|
| PVSEC-34                                   | Shenzhen, China | 06. – 10.11.2023    |
| Productronica                              | München         | 14. – 17.11.2023    |
| PVM Modultechnologie und Effizienzworkshop | Freiburg        | 16.11.2023          |
| DKV Tagung                                 | Hannover        | 22. – 24.11.2023    |
| MRS Fall Meeting & Exhibit                 | Boston, USA     | 26.11. – 01.12.2023 |
| DecarbXpo 2023                             | Düsseldorf      | 28. – 30.11.2023    |

## Dezember

|                   |          |                  |
|-------------------|----------|------------------|
| Hydrogen Dialogue | Nürnberg | 06. – 07.12.2023 |
|-------------------|----------|------------------|

Alle Angaben beruhen auf den bis zu Redaktionsschluss vorliegenden Daten! Bitte haben Sie Verständnis dafür, dass es 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

© Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE  
Freiburg, 2023

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

## Konzeption und Gestaltung

netsyn, Freiburg

## Druck

Druckerei Mainz, Aachen

Jahresbericht 2022/23  
Fraunhofer-Institut für  
Solare Energiesysteme ISE



# Bildnachweise

---

## Copyrights

Ferrostal AG/Solar Power Group/de Riese: Seiten 4/5  
Fraunhofer-Allianz Energie: Seite 14  
Fraunhofer CSP: Seiten 16, 69  
Fraunhofer Chile Research: Seite 17  
Deutscher Zukunftspreis: Seite 19  
shutterstock.com/Oleksandr Yakoniuk: Seiten 20/21  
Martin Stollberg: Seite 47 unten  
renderbaron, Düsseldorf: Seite 76 oben  
ASG Analytik-Service AG: Seite 85

Das Copyright aller anderen Bilder liegt beim Fraunhofer ISE.

## Fotografen

Sebastian Benkert: Seite 79  
Sybille Bernhard: Seite 72  
Kolja Bromberger: Seite 86  
Michael Eckmann: Seite 80  
Christian Hanner: Seite 70  
Aleksander Filipovic: Seite 50  
Myriam Kaiser: Seiten 51 oben, 73  
Guido Kirsch: Seite 12  
Oliver Kern: Seite 62  
Falko Knizia: Seiten 46 oben u. Mitte, 47 oben  
Tobias Neumann: Seite 46 unten  
Dirk Mahler: Titelbild, Seiten 2, 8 (Henning, Bett, Glunz, Preu, Hebling, Schossig), 28, 30, 32, 34, 36, 38, 40, 42, 44, 48/49, 53, 63 rechts, 81, 83 unten, 87 links, 88  
Stefan Mehnert: Seite 74 oben  
Fabian Meyer: Seite 66  
Marek Miara: Seite 76 unten  
Ralph Paas: Seiten 26/27  
Kasimir Reichmuth: Seite 60  
Bernd Schumacher: Seiten 8 (Wittwer, Vormfelde), 23, 64  
Timo Sigurdsson: Seite 9  
Kai-Uwe Wudtke: Seite 8 (Wirth)  
Johannes Wüllner: Seite 89 oben



