



**Fraunhofer**  
ISE

Fraunhofer-Institut für Solare  
Energiesysteme ISE

Forschen für die Energiewende

---

Jahresbericht 2023/24

*Das Titelbild zeigt die Detailansicht einer InCellPlate® Galvanikanlage zur Metallisierung von Silizium-Wafern. Bei dem Vorgang werden auf die Rohlinge in einem Elektrolyt-Bad lokale Metallkontakte aus elektrisch leitfähigem Kupfer gewachsen.*

*Die Verwendung von galvanisch abgeschiedenem Kupfer anstelle der marktüblichen gedruckten Silberkontakte auf Silizium-Solarzellen wurde am Fraunhofer ISE entwickelt und wird nun durch die Institutsausgründung PV2+ industrialisiert. Die Technologie birgt wesentliche Vorteile – so lassen Solarzellen mit Kontakten aus Kupfer Kostenvorteile erwarten. Zudem ist Kupfer in Deutschland leicht verfügbar und recycelbar. Dadurch kann die Solarzellenproduktion nachhaltiger gestaltet werden.*

Zahlen und Ergebnisse



Jahresbericht 2023/24



## Vorwort

---

Die vergangenen Jahre haben uns die Verletzlichkeit der europäischen Energieversorgung vor Augen geführt. Neben das Ziel der Klimaneutralität tritt deshalb künftig noch stärker die Anforderung einer erhöhten Resilienz. Das Fraunhofer ISE hat bereits vor über 40 Jahren damit begonnen, sich den zunehmend drängenden Fragen einer nachhaltigen Energieversorgung zu stellen. Einer, der viele dieser Fragen schon weit im Voraus gesehen und mit seinem Wirken die Basis für die erfolgreiche Arbeit des Instituts gelegt hat, ist im vergangenen Jahr verstorben – Prof. Dr. Adolf Goetzberger, Institutsgründer des Fraunhofer ISE, schied am 24. Februar 2023 im Alter von 94 Jahren aus dem Leben. Wir blicken mit Hochachtung und Dankbarkeit auf die visionäre Arbeit von Adolf Goetzberger und verneigen uns vor seinem wissenschaftlichen Lebenswerk und seinem unermüdlichen Einsatz für die Forschung an solaren Energiesystemen.

Sein Wirken ist für uns Vorbild und Ansporn zugleich, die Forschungsschwerpunkte des Instituts konsequent weiterzuentwickeln, um auch zukünftig wichtige Lösungsbeiträge zur erfolgreichen Umsetzung der Energiewende zu liefern. Um auf den wachsenden Bedarf an systemischen Lösungen besser reagieren zu können, haben wir das Fraunhofer ISE intern neu aufgestellt und unsere Kompetenzen gebündelt. Seit Juli 2023 gliedert sich das Institut in die vier Bereiche »Photovoltaik«, »Strom«, »Wärme und Gebäude« sowie »Wasserstofftechnologien«. Damit wir die steigende Nachfrage nach umfassenden Gesamtlösungen für eine resiliente und im Ziel klimaneutrale Energieversorgung von Industrieliegenschaften und Quartieren bedienen können, haben wir zudem die neue Programmlinie »Übergreifende Systemintegration« etabliert.

Wir haben uns sehr darüber gefreut, dass wir Ende September den neuen Präsidenten der Fraunhofer-Gesellschaft, Prof. Dr. Holger Hanselka, in Freiburg begrüßen durften. Herr Hanselka ist angetreten, die Mission der Fraunhofer-Gesellschaft zur Stärkung der Wirtschaft voranzutreiben und ihre Position als essenzieller Innovationslieferant für kleine, mittelständische und große Unternehmen weiter auszubauen. Kooperationen mit der Industrie stehen auch für uns am Fraunhofer ISE im Mittelpunkt: Ab diesem Jahr richten wir unsere Aktivitäten an acht neuen, marktorientierten Geschäftsfeldern aus.

Im Bereich Photovoltaik setzen wir uns für eine Wiederansiedelung der PV-Industrie in Europa ein. Wir unterstützen die Industrie hier durch Machbarkeits- und Wirtschaftlichkeitsanalysen, aber auch, indem wir die nächste Photovoltaik-Generation auf Basis von Mehrfachsolarzellen entwickeln. Der Aufbau einer europäischen Solarwirtschaft wird auch in Deutschland vehement verfolgt. Forschung und Industrie benötigen dabei schnelle staatliche Unterstützung. Rund hundert Akteurinnen und Akteure der Photovoltaikbranche fanden sich im Juli auf Einladung des Fraunhofer ISE am Fraunhofer ENIQ in Berlin zusammen, um über mögliche Kooperationen für neue PV-Produktionen in Deutschland zu diskutieren. Im Fokus unserer Forschungsarbeiten für die Solarindustrie steht weiterhin die Entwicklung neuer Zellen, Komponenten und Module und die Qualitätssicherung in der Anwendung. Für das Testen und Vermessen von PV-Modulen haben wir im Mai in Mering bei Freiburg unser [Outdoor-Testfeld](#) eröffnet, mit dem wir Labormessungen mit Freilandanalysen kombinieren können.

Im Jahr 2023 stand der Gebäudebereich besonders im Zentrum der öffentlichen Aufmerksamkeit und die Wärmepumpe war in aller Munde. Wir forschen weiterhin intensiv an der Verbesserung von Wärmepumpen, insbesondere zum Einsatz natürlicher Kältemittel wie Propan. In engem Austausch mit den Herstellern und der Wohnungsbauwirtschaft entwickeln wir Wärmepumpensysteme für Mehrfamilienhäuser des Gebäudebestands und begleiten Demonstrationsvorhaben und Feldtests. Das in der Öffentlichkeit stark diskutierte und nach langen Beratungen verabschiedete, novellierte Gebäudenergiegesetz (GEG) leitet den Umstieg auf das Heizen mit erneuerbaren Energien ein – wir nehmen dies als Ansporn, weiterhin tragfähige Lösungen für eine erfolgreiche Wärmewende zu entwickeln und die Wärmepumpentechnologie kostengünstiger und noch breiter anwendbar zu machen.

Besonders gefreut haben wir uns über die Preise und Auszeichnungen, die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts in diesem Jahr für ihre wissenschaftlichen Arbeiten erhalten haben. Hervorheben möchten wir den [Hertha-Spöner-Preis](#), mit dem die Deutsche Physikalische Gesellschaft Dr. Juliane Borchert für ihre Arbeit im Bereich neuer Solarzellenmaterialien ausgezeichnet hat, sowie den mit einer Million Euro dotierten

[Forschungspreis der Werner-Siemens-Stiftung](#), den Dr. Frank Dimroth und Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Bett erhalten haben. Unsere herzliche Gratulation gilt zudem PD Dr. Ralf Preu zur erfolgreichen Habilitation im Themengebiet PERC-Technologie für Solarzellen, Prof. Dr. Sonia Dsoke zur Berufung auf die W3-Professur »Elektrochemische Energiespeicher und Speichersysteme« und Prof. Dr. Holger Neuhaus zur Berufung auf die W3-Professur »Materialsysteme für die Solarenergienutzung«. Beide Professuren sind am Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH) der Technischen Fakultät der Universität Freiburg angesiedelt und sind mit einer Tätigkeit am Fraunhofer ISE verbunden. Gleichmaßen gratulieren wir Dr. Peter Schossig zur Berufung auf die W3-Professur »Technologien für klimagerechte Gebäude und Quartiere« am KIT in Karlsruhe; auch diese Professur mit Antritt zum 1. April 2024 ist mit einer Tätigkeit am Fraunhofer ISE verknüpft.

Der Umbau unseres globalen Energiesystems mit hohen Anteilen erneuerbarer Energien wird nur erfolgreich sein, wenn dabei alle Nachhaltigkeitsanforderungen eingelöst werden. Daher haben wir das Thema Nachhaltigkeit als Kernelement in unsere Institutsstrategie aufgenommen. Wir wollen Nachhaltigkeitsfragen sowohl von Anfang an konsequent in unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten einbeziehen als auch unseren Institutsbetrieb sukzessive klimaneutral gestalten. Ein wichtiger Schritt auf diesem Weg ist die im September erfolgte Zertifizierung nach der Norm DIN EN ISO 50001:2018 für Energiemanagement. Als eines der ersten nach dieser Norm zertifizierten Fraunhofer-Institute haben wir damit zugleich eine Vorlage erarbeitet, mit der die Zertifizierungsprozesse für weitere Fraunhofer-Institute deutlich beschleunigt werden können.

Unseren Kuratoriumsmitgliedern, Industriepartnern, Stipendengebern, Fördermittelgebern auf Bundes- und Länderebene sowie unseren Projektpartnern möchten wir unseren großen Dank für ihr Vertrauen in unsere Arbeit sowie ihre Unterstützung und Förderung des Fraunhofer ISE aussprechen. Wir freuen uns sehr auf die weitere Zusammenarbeit.



Prof. Dr. Hans-Martin Henning



Prof. Dr. Andreas Bett



# Inhalt

---

Daten und Zahlen .....	6
Strategie und Geschäftsbereiche .....	22
Highlights unserer Forschung .....	52
Veranstaltungen 2024 .....	87
Impressum .....	88
Bildnachweise .....	88

Regelmäßige Infos zu  
Meilensteinen unserer  
Forschung bieten  
unsere Newsletter!





# Daten und Zahlen

---





# Inhalt

---

Organisationsstruktur .....	8
In Memoriam .....	9
Profil .....	10
Kuratorium .....	11
Das Institut in Zahlen .....	12
Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft .....	14
Kooperationen .....	15
Arbeiten am Fraunhofer ISE .....	16
Promotionen .....	18
Professuren und Habilitation .....	19
Preise und Auszeichnungen .....	20
Nachhaltigkeit .....	21

# Organisationsstruktur



Das Fraunhofer ISE gliedert sich neben Verwaltung und Stabsstellen in die vier großen wissenschaftlichen Bereiche »Photovoltaik«, »Strom«, »Wärme und Gebäude« sowie »Wasserstofftechnologien«. Außerdem hat das Institut die Programmlinie »Übergreifende Systemintegration« etabliert.

## Institutsleitung

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

Telefon +49 761 4588-5134

**Prof. Dr. Andreas Bett**

Telefon +49 761 4588-5257



In der Außendarstellung operieren wir in acht marktorientierten Geschäftsfeldern:

## Verwaltungsdirektion

**Saskia Vormfelde**

Telefon +49 761 4588-5917

- Photovoltaik – Materialien, Zellen, Module
- Photovoltaik – Produktionstechnologie und Transfer
- Solarkraftwerke und Integrierte Photovoltaik
- Leistungselektronik und Stromnetze
- Elektrische Energiespeicher
- Klimaneutrale Wärme und Gebäude
- Wasserstofftechnologien
- Systemintegration

## Bereichsleitung Photovoltaik

**Prof. Dr. Stefan Glunz**

Telefon +49 761 4588-5191



**PD Dr. Ralf Preu**

Telefon +49 761 4588-5260



## Bereichsleitung Strom

**Dr. Harry Wirth**

Telefon +49 761 4588-5858



## Bereichsleitung Wärme und Gebäude

**Dr. Peter Schossig**

Telefon +49 761 4588-5130



In beratender Funktion wird das Fraunhofer ISE von langjährigen Begleitern und erfahrenen Experten der Solarbranche unterstützt:

## Bereichsleitung Wasserstofftechnologien (kommissarisch)

**Ulf Groos**

**Dr. Achim Schaadt**

**Dr. Tom Smolinka**

**Robert Szolak**

Telefon +49 761 4588-0



**Prof. Dr. Joachim Luther**

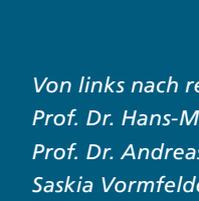
(Institutsleiter 1993–2006)

**Prof. Dr. Volker Wittwer**

(stellvertretender Institutsleiter 1997–2009)

**Prof. Dr. Eicke R. Weber**

(Institutsleiter 2006–2016)



Von links nach rechts:

Prof. Dr. Hans-Martin Henning,

Prof. Dr. Andreas Bett,

Saskia Vormfelde,

Prof. Dr. Stefan Glunz,

PD Dr. Ralf Preu, Dr. Harry Wirth,

Dr. Peter Schossig,

Prof. Dr. Christof Wittwer

# In Memoriam

---

Der Solarpionier und Gründer des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme ISE, Prof. Dr. Adolf Goetzberger, ist am 24. Februar 2023 im Alter von 94 Jahren verstorben. Damit hat das Fraunhofer ISE einen geschätzten Wissenschaftler und visionären Vordenker der Solarenergie verloren, der bis zuletzt dem Institut beratend zur Seite stand.

Gegen große Widerstände hatte Adolf Goetzberger, damals Institutsleiter des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Festkörperphysik IAF, 1981 die Ausgründung einer Arbeitsgruppe für solare Energiesysteme zum eigenständigen Institut durchgesetzt. Adolf Goetzberger leitete das Fraunhofer ISE in Freiburg von seiner Gründung bis zu seinem altersbedingten Ausscheiden 1993. Das Institut, in dem von Beginn an die Einheit von Solarenergie- und Energiesystemtechnik gedacht und gelebt wurde, wuchs rasch zu einem der führenden Institute für Solarforschung heran und ist heute das größte Solarforschungsinstitut Europas.

Adolf Goetzberger promovierte nach einem Studium der Experimentalphysik 1955 an der Universität München über die Kristallisation aufgedampfter Antimonschichten. Er arbeitete anschließend zusammen mit dem Nobelpreisträger und Mitfinder des Transistors William Shockley im kalifornischen Palo Alto und in den berühmten Bell Laboratories in Murray Hill, New Jersey. 1968 kehrte er nach Deutschland zurück und übernahm die Leitung des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Festkörperphysik IAF. 1971 wurde er von der Universität Freiburg zum Honorarprofessor an der Fakultät für Physik ernannt und betreute in dieser Funktion zahlreiche Diplom- und Doktorarbeiten.

Er werde oft gefragt, wie er gerade auf die Sonnenenergie kam, die damals als Energiequelle überhaupt nicht ernst genommen wurde, schrieb Adolf Goetzberger 2018 in einem Rückblick auf sein Leben. Ihn faszinierte vor allem die Studie »Die Grenzen des Wachstums« vom Club of Rome von 1972. Es erschien ihm einleuchtend, dass wir Menschen die Sonne als unerschöpfliche Energiequelle nutzen müssen, da die fossilen Energieressourcen endlich seien.

Adolf Goetzberger war Inhaber von über 30 Patenten; seine gemeinsam mit Armin Zastrow bereits 1981 entwickelte Idee der Agri-Photovoltaik erlebt heute ihren Durchbruch. In vielen Gutachterausschüssen, Kuratorien, Kommissionen und Arbeitsgruppen wurden seine Mitarbeit und sein Urteil



*Der Solarpionier und Gründer des Fraunhofer ISE, Prof. Adolf Goetzberger, verstarb am 24. Februar 2023 im Alter von 94 Jahren.*

sehr geschätzt. So war Adolf Goetzberger zum Beispiel von 1993 bis 1997 Präsident der Deutschen Gesellschaft für Sonnenenergie.

Die Verdienste Adolf Goetzbergers für die Solarenergienutzung wurden auf vielfältige Weise gewürdigt: Als erster Deutscher wurde Adolf Goetzberger 1983 mit dem J. J. Ebers Award der amerikanischen IEEE Electron Devices Society für die Entwicklung des Silizium-Feldeffekttransistors ausgezeichnet. Weiterhin erhielt er 1989 die Verdienstmedaille des Landes Baden-Württemberg und 1992 das Bundesverdienstkreuz erster Klasse. 1993 wurde er mit dem Achievement through Action Award der International Solar Energy Society (ISES) ausgezeichnet. 1995 erhielt er die Ehrendoktorwürde der Universität Uppsala und den Farrington Daniels Award der ISES. Es folgten 1997 die Karl-Boer-Medaille, der Becquerel-Preis und der William R. Cherry Award. 2006 verliehen ihm die Solar World AG den Einstein Award und EUROSOLAR den European Solar Award. Im Jahre 2009 wurde er vom Europäischen Patentamt in der Kategorie »Lebenswerk« mit dem Europäischen Erfinderpriis ausgezeichnet.

Die Institutsleitung und alle Mitarbeitenden des Fraunhofer ISE verneigen sich vor dem Lebenswerk von Adolf Goetzberger und sind ihm dankbar für seine Verdienste zur Entwicklung der solaren Energiesysteme und damit für seinen großen Beitrag für eine globale Energiewende.

# Profil

## Zielsetzung

Das Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE in Freiburg ist das größte Solarforschungsinstitut Europas. Unsere über 1400 Mitarbeitenden setzen sich für ein nachhaltiges, wirtschaftliches, sicheres und sozial gerechtes Energieversorgungssystem auf Basis erneuerbarer Energien ein. Dazu tragen wir mit unseren Forschungsschwerpunkten Energiebereitstellung, Energieverteilung, Energiespeicherung und Energienutzung bei. Durch herausragende Forschungsergebnisse, erfolgreiche Industrieprojekte, Firmenausgründungen und globale Kooperationen gestalten wir die nachhaltige Transformation des Energiesystems. Das Fraunhofer ISE finanziert sich über eine Grundfinanzierung und Sonderprogramme der Fraunhofer-Gesellschaft sowie Sonstige (17 Prozent), zu rund 62 Prozent durch öffentliche Mittel (Bund, Bundesländer und EU) sowie durch Aufträge aus der Industrie (21 Prozent). 2023 betrug der Gesamthaushalt des Instituts 135,3 Millionen Euro (vorläufig). Das Institut ist nach der Qualitätsmanagementnorm DIN EN ISO 9001:2015 zertifiziert.

## Forschungsansatz

Unser Anspruch ist, konkret umsetzbare technische Lösungen zu entwickeln, die wir unseren Industriepartnern zur Verfügung stellen oder mit ihnen gemeinsam erarbeiten. Damit tragen wir dem Fraunhofer-Prinzip der angewandten Forschung Rechnung und leisten zugleich einen wichtigen Beitrag zur deutschen und europäischen Standortsicherung 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 acht marktorientierte Geschäftsfelder (Seite 30 ff.) unterteilt. Unser Forschungsansatz reicht von der Materialforschung über die Entwicklung von Komponenten bis hin zur Systemintegration. Da insbesondere systemische Fragen im Zuge der Energiewende immer relevanter werden, hat das Fraunhofer ISE zum Juli 2023 eine neue Organisationsstruktur etabliert, um noch stärker interdisziplinär und vernetzt zu forschen (S. 26).

## Leistungen

Das Fraunhofer ISE verfügt über eine hervorragende technische Infrastruktur. 22 300 m<sup>2</sup> Laborfläche – darunter 900 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 drei produktionsnahe Technologie-Evaluationszentren (Seiten 46 ff.). 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

Hauptgebäude des Fraunhofer ISE.



# 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**

JENOPTIK Optical Systems GmbH, Jena

### **MinisterialdirigentIn Sibylle Hepting-Hug**

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

### **Prof. Dr. Wolfram Münch**

EnBW Energie Baden-Württemberg AG, Karlsruhe

### **Dr.-Ing. Norbert Schiedeck**

Vaillant Group, Remscheid

### **Peter Schneidewind**

RENA Technologies GmbH, Gütenbach



*Mitglieder des Kuratoriums sowie externe Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Kuratoriumssitzung im Juli 2023. V.l.n.r.: Jürgen Heizmann, Pia von Ardenne, Dr. Stefan Reber, Burkhard Holder, Prof. Dr.-Ing. Michael Bauer, Dr.-Ing. Ingrid Vogler, Dr. Joachim Kloock, Peter Schneidewind, Dr. Norbert Schiedeck, Ullrich Bruchmann, Prof. Dr. Anke Weidlich, MinisterialdirigentIn Sibylle Hepting-Hug, Thomas Speidel.*

### **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

### **Dr.-Ing. Ingrid Vogler**

GdW Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen e.V., Berlin

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

Fraunhofer-Einrichtung für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS, Alzenau

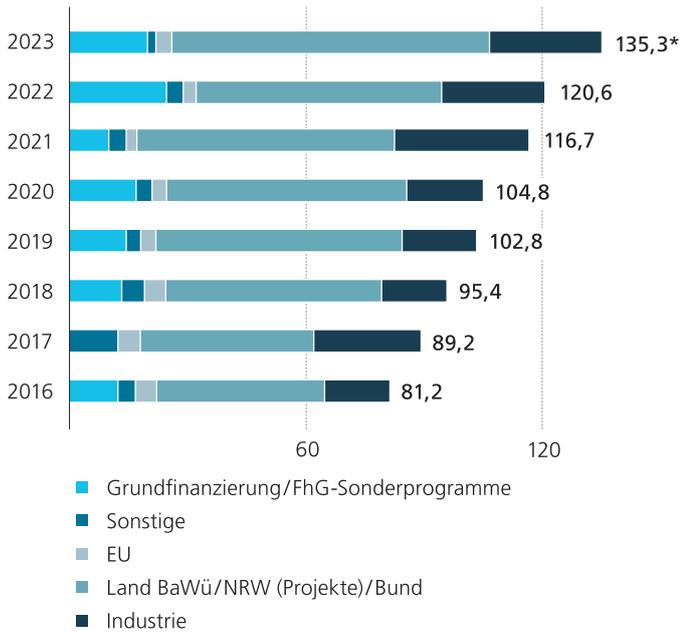
### **Prof. Dr. Anke Weidlich**

Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg

(Stand: 31.12.2023)

# Das Institut in Zahlen

## Entwicklung der Erträge in Mio €

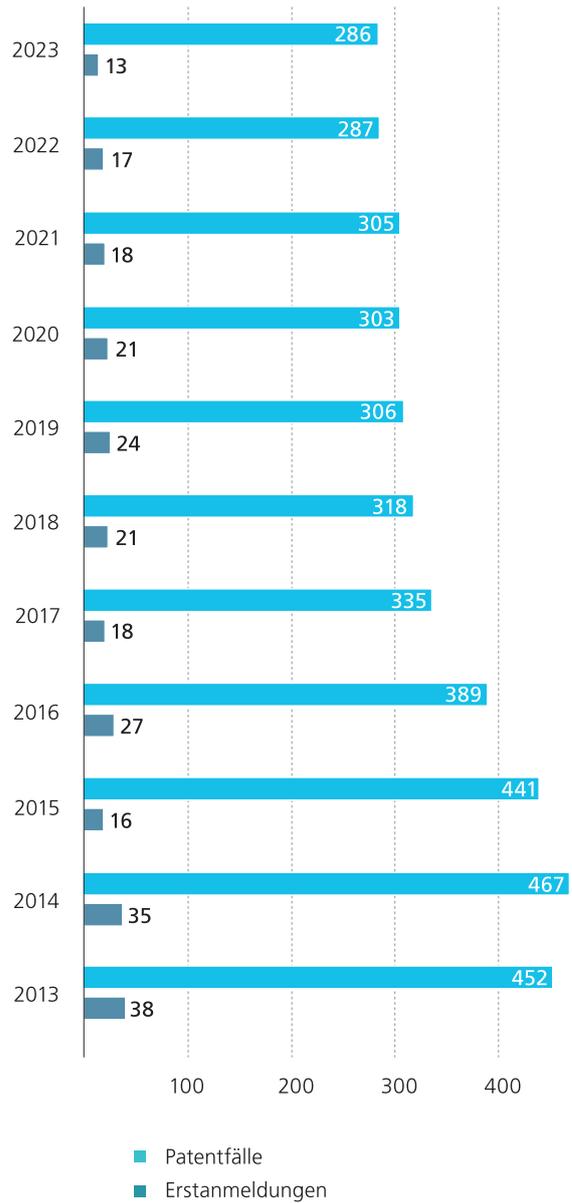


## Entwicklung der Ausgaben in Mio €

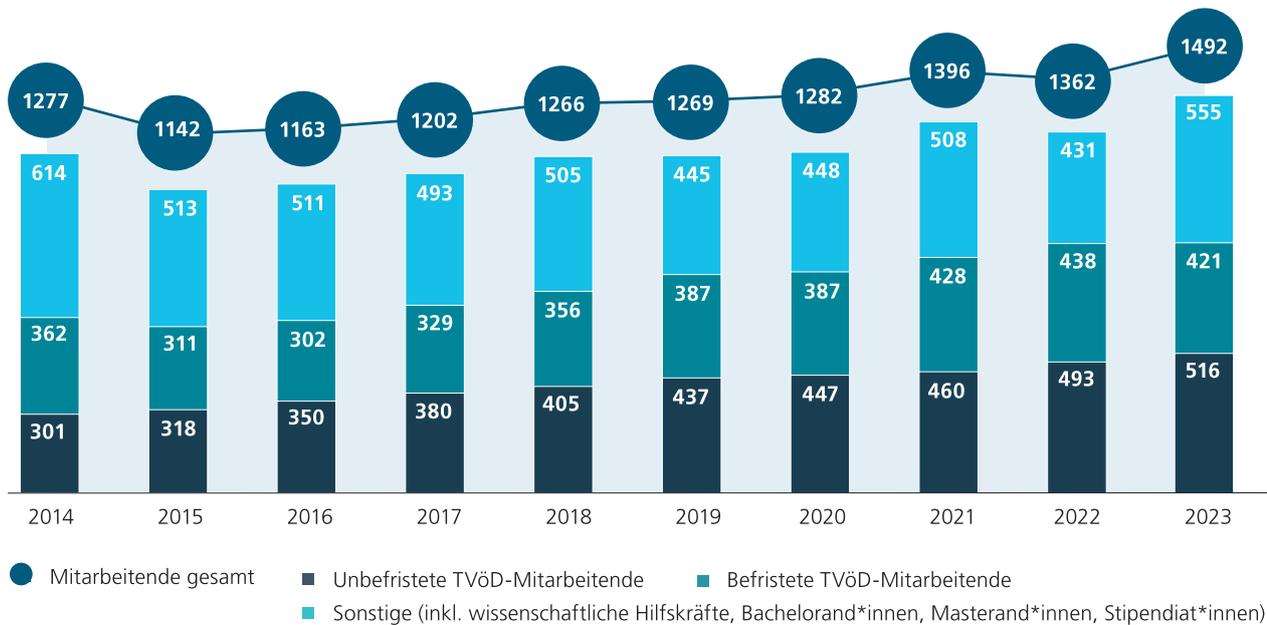


\* Vorläufig

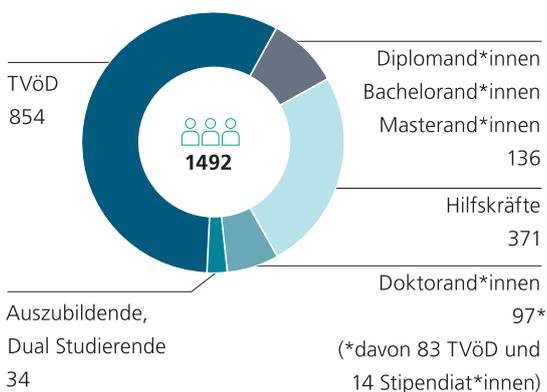
## Patente



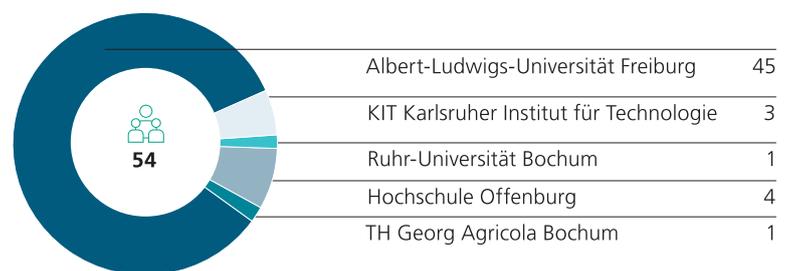
👤👤👤 **Entwicklung der Mitarbeitendenzahlen**



**Personalstruktur**



**Lehrveranstaltungen**



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

# Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft

Durch die Vernetzung innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft bringt das Fraunhofer ISE eine große Bandbreite an Kompetenzen in unterschiedliche Verbände und Allianzen ein. Dies stärkt besonders die Bearbeitung systemischer Fragestellungen.

## Verbände und strategische Forschungsfelder

Die Fraunhofer-Institute arbeiten in kompetenzorientierten Verbänden 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 ist Sprecher dieses Verbunds. 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, Direktor Internationales am Fraunhofer ISE, ist gemeinsam mit Prof. Dr. Mario Ragwitz von der Fraunhofer-Einrichtung für Energieinfrastrukturen und Geothermie IEG als Sprecher für das strategische Forschungsfeld »Wasserstofftechnologien« zuständig.

## Leitmarktorientierte Fraunhofer-Allianzen

Neben wissenschaftlicher Exzellenz steht in der anwendungsorientierten Forschung die Förderung des Transfers in Wirtschaft und Gesellschaft im Fokus. Vor diesem Hintergrund hat die Fraunhofer-Gesellschaft neun Leitmärkte definiert, die prioritär von branchenorientierten Allianzen adressiert werden.

Das Fraunhofer ISE ist eines von 19 Mitgliedsinstituten der Fraunhofer-Allianz [Energie](#) und seit deren Gründung im Jahr 2003 zudem 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 Geschäftsfeldern »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 sowie Aviation & Space, im [Fraunhofer Cluster of Excellence Integrierte Energiesysteme](#), [CINES](#) sowie den Fraunhofer-Netzwerken Nachhaltigkeit und Wasserstoff.

*Die Fraunhofer-Allianz Energie präsentierte sich vom 23. bis 25. Mai 2023 mit einem Gemeinschaftsstand auf der Messe E-world energy & water in Düsseldorf.*



# 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; am Institut arbeiten ca. 230 Bachelor-, Master- und Promotionsstudierende. Zudem engagiert sich das Fraunhofer ISE 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.

*Studierende in Freiburg: Das Fraunhofer ISE setzt sich in vielfältigen Kooperationen für die Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchses ein.*



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 und Batterieforschung 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 der Bachelor- und Masterstudiengang »Sustainable Systems Engineering« sowie die Masterstudiengänge »Renewable Energy Engineering and Management« und »Solar Energy Engineering«.

## Memoranda of Understanding

Zudem hat das Fraunhofer ISE 16 Memoranda of Understanding mit Unternehmen, Organisationen und Forschungseinrichtungen weltweit im Jahr 2023 abgeschlossen. Auf nationaler wie internationaler Ebene ist das Institut in Forschungs- und Branchenverbänden gut vernetzt.



# Arbeiten am Fraunhofer ISE

Seit der Gründung des Fraunhofer ISE ist das Institut stetig gewachsen und zählt heute zu den größten innerhalb der Fraunhofer-Gesellschaft. Auch in der Öffentlichkeit hat unser erklärtes Ziel – eine nachhaltige und sozial gerechte Energieversorgung ohne fossile Brennstoffe – enorm an Bedeutung gewonnen. Ohne unsere exzellente Laborinfrastruktur, vor allem aber das Know-how, das Engagement und die Kreativität unserer über 1400 Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter wäre dieser Erfolg nicht denkbar gewesen – denn Wissenschaft und ihr Transfer in Politik, Industrie und Gesellschaft lebt von den Menschen, die sie prägen. Die Wahl unserer Mitarbeitenden und ihre Bindung ans Institut sind uns daher ein besonderes Anliegen. Nicht umsonst zählt die Fraunhofer-Gesellschaft zu den [beliebtesten Arbeitgebern Deutschlands](#).

## Die Energiewende gemeinsam gestalten

»Arbeiten am Fraunhofer ISE bedeutet, mehr als nur einen Job zu machen«, betont Thomas Arnsberg, der das Personalwesen am Institut leitet. »Es bedeutet, jeden Tag etwas Sinnvolles für die Zukunft zu tun. Das gilt für die wissenschaftlichen Mitarbeitenden ebenso wie für diejenigen aus der Verwaltung. Wir ziehen alle an einem Strang.« Dieser Wille, gemeinsam auf ein Ziel hinzuarbeiten, ist spürbar: so wird die angenehme und konstruktive Art der Zusammenarbeit am Institut von vielen Insidern auch liebevoll als »ISE-Spirit« bezeichnet. Darüber hinaus sind die Kultur und das Miteinander am ISE geprägt von Werten wie Toleranz und Chancengleichheit – unabhängig von Herkunft, Religion, Geschlecht oder Alter.

Wir öffnen Türen,  
hinter denen Wissen  
wachsen kann.

Veränderung startet mit uns.

## Vielfältige Aufgaben mit Perspektive

Unsere Mitarbeitenden arbeiten an allen Facetten der Energiewende mit. In den Forschungsbereichen »Photovoltaik«, »Strom«, »Wärme und Gebäude« sowie »Wasserstofftechnologien« bieten wir Berufseinsteigern und Berufseinsteigerinnen oder Promotionsinteressierten ebenso attraktive Perspektiven wie Fach- und Führungskräften mit Berufserfahrung. Dabei sind uns nicht nur wissenschaftliche Mitarbeitende willkommen, auch Interessierte an technischen Berufen, Ingenieure und Ingenieurinnen sowie Fachpersonal aus dem Verwaltungsbereich finden ihren Weg ans Fraunhofer ISE. Zudem bilden wir in den Berufsfeldern IT und Technik sowie in kaufmännischen Berufen aus.

## Vom Förderprogramm bis zur Sonnenterrasse

Immer wichtiger ist in der heutigen Arbeitswelt ein guter Ausgleich zwischen Beruf und Privatleben. Unseren Mitarbeitenden bieten wir daher:

- Kollegiale und konstruktive Zusammenarbeit
- Individuelle und flexible Arbeitszeitgestaltung mit Homeoffice-Option
- Hochmoderne Arbeitsplatz- und Laborinfrastruktur
- Vergünstigung für Kita-Plätze, Ferienfreizeiten für Schulkinder, pme-Familienservice
- Hansefit, Zuschuss zum Jobticket, Betriebliche Altersvorsorge (VBL)
- Gezielte Talentförderung durch diverse Förderprogramme für unterschiedliche Zielgruppen
- Abwechslungsreiches und gesundes Mittagessen in unserer Kantine mit großer Sonnenterrasse

## Frauen in der Wissenschaft stärken

Es ist unser erklärtes Ziel, die Position von Frauen in der Wissenschaft zu stärken. Aktuell beträgt der Frauenanteil in der Wissenschaft am Fraunhofer ISE rund 22 Prozent. Diesen Anteil möchten wir auf 25 Prozent im Jahr 2025 und 30 Prozent im Jahr 2030 erhöhen. Außerdem streben wir einen Frauenanteil an den Führungspositionen in Höhe von 25 Prozent im Jahr 2025 und 30 Prozent im Jahr 2030 an.

Dazu tragen u. a. unsere Förderprogramme bei, die sich an verschiedene Zielgruppen auf unterschiedlichen Karrierestufen richten. So starten wir bereits bei den studentischen Mitarbeitenden mit dem Programm »ISE Young Talents«, das pro Jahr 40 Studierenden ermöglicht, die vielfältigen Forschungsbereiche des Fraunhofer ISE durch Laborbesuche, Netzwerkveranstaltungen und Fachvorträge zu entdecken. Die Studenten und Studentinnen schauen dabei über den Tellerrand der eigenen Arbeitseinheit hinaus und vernetzen sich mit anderen Mitarbeitenden des Instituts. Darüber hinaus begleiten wir sie über gemeinsame Weiterbildungen und Workshops fachlich und persönlich. Die verfügbaren Plätze vergeben wir zu mindestens 50 Prozent an Frauen.

## Weitere Förderprogramme sind:

- »DokInCareer« für Doktorandinnen während der Promotion
- »Femovation« für Wissenschaftlerinnen mit eigener Projektidee
- »TALENTA start«, »TALENTA speed up« und »TALENTA excellence« für Wissenschaftlerinnen auf drei verschiedenen Karrierestufen

Mithilfe dieser Programme ermöglichen wir den Kandidatinnen, sich Zeit für das Schreiben ihrer Doktorarbeit oder das Vorantreiben ihrer Karriereziele zu nehmen. Seminar- und Workshopbesuche zu spezifischen Themen sowie Mentoring dienen der persönlichen und fachlichen Weiterentwicklung. Zugleich unterstützen wir das Netzwerken mit anderen Geförderten am Fraunhofer ISE.

*Geteiltes Wissen: Die Bibliothek des Fraunhofer ISE bietet Mitarbeitenden und Forschenden umfassende Dienstleistungen an.*



# Promotionen

## **Sven Auerswald**

»Dezentrale Fassaden-integrierte Wohnungslüftungsgeräte: kombinierte Bewertung des erzielten Luftaustausches und der Energieeffizienz«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

## **Varun Arya**

»Laser Ablation of Dielectric Layers of Solar Cells«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

## **Oliver Fitz**

»Entwicklung einer Zink-Ionen-Batteriezellentechnologie mit wässrigen Elektrolyten für stationäre Anwendungen«  
Universität Stuttgart, 2023

## **Sebastian Gamisch**

»Untersuchung eines Thermomanagementsystems für stationäre Batteriespeicher basierend auf Phasenwechselmaterialien«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

## **Katharina Gensowski**

»Low-temperature Front-side Metallization for Solar Cell Applications Using a Parallel Dispensing Technology«,  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

## **Gregor Gorbach**

»Internal Carbon Pricing and its Use for the Decarbonisation in Organisations Considering Price Uncertainties«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

## **Arne Groß**

»Stochastic Model Predictive Control for Smart Grid Applications«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

## **Benjamin Hammann**

»The Influence of Hydrogen on Silicon Solar Cells: Investigating the Link to Degradation Mechanisms«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

## ISE Research School



*Am 24. Oktober 2023 fand das 2. ISE DOK-Kolloquium im Solar Info Center in Freiburg statt.*

Das Fraunhofer ISE hat im April 2023 die ISE Research School ins Leben gerufen. Mit dem Graduiertenkolleg will das Institut die Ausbildung seiner Doktorandinnen und Doktoranden bestmöglich unterstützen und die abteilungsübergreifende Vernetzung fördern.

Das Programm ist für alle Promovierenden des Fraunhofer ISE offen und umfasst die Sparten Forschung, Lehre und überfachliche Weiterbildung.

Die ISE Research School bietet einen Ort für die Vernetzung und den interdisziplinären Austausch: Zweimal im Jahr findet das ISE DOK-Kolloquium statt, auf dem die Promovierenden ihre Arbeiten in Form von Vorträgen oder Postern vorstellen. Zudem umfasst das Programm Vorträge renommierter Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler: So hielt am 24.10.2023 der Nachhaltigkeitsforscher Prof. Dr. Arnim Wiek im Rahmen des Kolloquiums einen Gastvortrag.

Langfristig will das Fraunhofer ISE mit dem strukturierten Programm die umfassende Ausbildung der Promovierenden weiter verbessern und die Attraktivität des Instituts für zukünftige Promotionsvorhaben steigern.

**Lotta Koch**

»Energy Performance and Ecological Potential of Solar Thermal Façade Collectors Made of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) for a CO<sub>2</sub> Neutral Heat Supply«  
Technische Universität München, 2023

**Franz Mantei**

»Large-scale Production of Oxymethylene Dimethyl Ethers«  
Technische Universität Berlin, 2023

**Marius Meßmer**

»Development and Characterization of Resource-Saving Doping Processes for Industrial Silicon Solar Cells«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

**Jakob Metz**

»Entwicklung und experimentelle Analyse eines Mehrquellen-Wärmepumpensystems aus Erdreich und Außenluft«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

**Sebastian Roder**

»Laserbasierte Wärmebehandlung zur Wirkungsgradstabilisierung und -steigerung von Solarzellen«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

**Stephan Schindele**

»Nachhaltige Landnutzung dank Doppelernte. Eine mehrdimensionale Politikanalyse der Agri-Photovoltaik-Diffusion in Deutschland«  
Eberhard Karls Universität Tübingen, 2023

**Patrick Schygulla**

»III-V-Semiconductor Subcell Absorbers in Silicon-Based Triple-Junction Solar Cells«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

**Charlotte Senkpiel**

»Kopplung sozialwissenschaftlicher und individueller Aspekte mit Energiesystemmodellen. Theoretische Betrachtungen, Diffusion von Elektromobilität und Effekte regionaler Selbstversorgungsziele auf das Stromsystem«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

**Maximilian Trommsdorff**

»Techno-Economic Analyses of Agrivoltaics: Approaches in Arable Farming, Technology Choice, and Economic Performance in Horticulture«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

**Jakob Ungerland**

»Äquivalente dynamische Modellierung aktiver Verteilnetze mit netzfolgenden und netzbildenden Umrichtern«  
Universität Stuttgart, 2023

**Natapon Wanapinit**

»Characterization of Operational Flexibility Resources and Evaluation of Potential Utilization in Distributed Energy Systems«  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

**Zalma Zouhair**

»Perovskite Photovoltaic Devices: Charge Selectivity of Carbon-Based Electrodes«  
Abdelmalek Essaadi University, Marokko, 2023

## Professuren und Habilitation

---

**Prof. Dr. Sonia Dsoke**

W3-Professur »Elektrochemische Energiespeicher und Speichersysteme« am Institut für Nachhaltige Technische Systeme (INATECH), Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

**Prof. Dr. Holger Neuhaus**

W3-Professur »Materialsysteme für die Solarenergienutzung« an der Technischen Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

**PD Dr. Ralf Preu**

Habilitation, Privatdozent für »Nachhaltige Technische Systeme« an der Technischen Fakultät, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, 2023

**Dr. Peter Schossig**

Ruf auf die W3-Professur »Technologien für klimagerechte Gebäude und Quartiere« an der Fakultät für Architektur, Karlsruher Institut für Technologie, 2023

# Preise und Auszeichnungen

## **Luis Eduardo Alanis**

IEEE PVSC, Best Poster Award, »Analysis of Thermal Behavior and Reliability of Bare Die Diodes Embedded Within PV Modules as Bypass Devices«, IEEE PVSC Committee

## **Dr. Andreas Beinert**

3. Platz 38. PV-Symposium, Poster »Bewertung von PV-Anlagen für Wind und Schneelasten mit FEM-Simulationen«

## **Prof. Dr. Andreas Bett, Dr. Frank Dimroth**

Forschungspreis der Werner Siemens-Stiftung, Finalisten im Wettbewerb um das »Jahrhundertprojekt« der Stiftung

## **Dr. Dmitry Bogachuk**

Eva-Mayr-Stihl-Nachwuchspreis, Doktorarbeit »Understanding and Improving Perovskite Photovoltaic Devices with Carbon-based Back-Electrodes«, Eva Mayr-Stihl Stiftung

## **Dr. Juliane Borchert**

Hertha-Sponer-Preis, Forschung zu neuen Solarzellen-Materialien, Deutsche Physikalische Gesellschaft

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

Start-up BW Elevator Pitch 2023, Geschäftsidee »PV2+«, start-up bw

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

Freiburger Innovationspreis 2023, »Galvanikverfahren zum Ersatz von Silber durch Kupfer für Solarzellenkontakte«, Geschäftsidee »PV2+«, Technologiestiftung BioMed Freiburg

## **Oliver Fischer**

Student Award, »Spatially Resolved and Subcell-Selective Implied Open-Circuit Voltage Measurements on Perovskite Silicon Tandem Solar Cells«, EU PVSEC 2023

## **Benjamin Hammann**

SiliconPV Award 2023, Best Paper »Understanding the Firing Cooling Ramp's Influence on Light and Elevated-Temperature-Induced Degradation in Silicon«

## **Dr. Oliver Höhn**

Consolidator Grant, Forschung an höchsteffizienten Solarzellen, Europäischer Forschungsrat

## **Dr.-Ing. Florian Nestler**

Peter und Luise Hager-Preis 2023, Promotion »Dynamic Operation of Power-to-X Processes Demonstrated by Methanol Synthesis«, Karlsruher Institut für Technologie

## **Paul Schlegel**

2. Platz Förderpreis der Stiftung Energieinformatik, Kategorie »Beste Masterarbeiten«, Masterarbeit »Charakterisierung und techno-ökonomische Analyse von Verwertungspfaden für Sauerstoff als Nebenprodukt der Wasserelektrolyse«

## **Paul Schlegel**

Innovationspreis des Deutschen Wasserstoff- und Brennstoffzellen-Verbands in der Rubrik »Master«, Masterarbeit »Charakterisierung und techno-ökonomische Analyse von Verwertungspfaden für Sauerstoff als Nebenprodukt der Wasserelektrolyse«

## **Dr.-Ing. Yam Siwakoti**

Preisträger des Fraunhofer-Bessel-Forschungspreises der Humboldt-Stiftung; Forschungsaufenthalt am Fraunhofer ISE

## **Masterand\*innen-Preis des Vereins zur Förderung der solaren Energiesysteme e.V.**

## **Johanna Aulich**

Masterarbeit »Advanced IV Characterization Methods for Triple-Junction Solar Cells under Different Spectral Conditions«

## **Mohamed Mahmoud**

Masterarbeit »Tuning Crystallization for Highly Efficient Monolithic Perovskite Silicon Tandem Solar Cells«

## **Anna Rothenhäusler**

Masterarbeit »Control of Battery Systems in Industrial Companies with Reinforcement Learning«

## **Ella Susann Supik**

Masterarbeit »Electrical and Optical Defect Characterization of Epitaxially Grown Silicon«

## **Nicolas Vollmar**

Masterarbeit »Auslegung, Aufbau und Inbetriebnahme eines 100 kVA-Antriebsinverters für hybrid-elektrische Antriebssysteme in der Luftfahrt«

# Nachhaltigkeit

Als Wegbereiter für die Transformation zu einer erneuerbaren und effizienten Energieversorgung fühlen wir uns am Fraunhofer ISE der Nachhaltigkeit in besonderem Maße verpflichtet. Daher richten wir unsere Institutsstrategie am Leitbild einer umfassenden Nachhaltigkeit aus. Dies bedeutet für uns, Nachhaltigkeit Schritt für Schritt in unser operatives und inhaltliches Handeln zu integrieren: in unsere Forschungs- und Entwicklungsprojekte, in Personalanlässen und Baumaßnahmen sowie in Betrieb und Organisation. Um diesen Prozess zu unterstützen, setzen wir uns kontinuierlich neue Ziele und evaluieren, ob die entsprechenden Maßnahmen erfolgreich waren.

## Forschung und Entwicklung

Die großen gesellschaftlichen Herausforderungen wie die Energiewende erfordern eine inter- und häufig eine transdisziplinäre Herangehensweise. Daher arbeiten wir am Fraunhofer ISE in zahlreichen Forschungs- und Entwicklungsprojekten institutsübergreifend an Gesamtlösungen für klimaneutrale Quartiere, Kommunen und Industrieliegenschaften. Um uns für die wissenschaftliche Begleitung dieser Prozesse noch besser aufzustellen, werden wir unsere Nachhaltigkeitskompetenzen stärken, interne und externe Schnittstellen besser vernetzen sowie »blinde Flecken« im FuE-Betrieb identifizieren.

Die Erarbeitung von Lösungsansätzen und Entscheidungsgrundlagen für die Energiewende stellen wir in den Kontext der »Sustainable Development Goals«. Unsere FuE-Projekte mit besonderer Wirkung zur Nachhaltigkeit sind im Folgenden mit einem Symbol  markiert (ab Seite 54).

## Betrieb und Organisation

Nachhaltigkeit im operativen Institutsgeschäft heißt für uns insbesondere, Energie zu sparen und den Betrieb unserer Anlagen und Gebäude sukzessive klimaschonender und perspektivisch klimaneutral zu gestalten. In den vergangenen zwei Jahren haben wir Prozesse implementiert, um den Strom- und Gasverbrauch zu senken, etwa durch energieoptimierte Abläufe



*Das Fraunhofer ISE nutzt den Strom von Deutschlands erster solarer Radwegüberdachung. Die Anlage befindet sich in der Nähe des Instituts an der Messe Freiburg.*

in unseren Labors. Als energieintensives Forschungsinstitut entwickelt das Fraunhofer ISE derzeit eine Klimastrategie, die unter anderem eine Reduktion des externen Strombezugs um 25 Prozent bis 2025 im Vergleich zum Basisjahr 2019 vorsieht. Diese Zielmarke wollen wir durch einen Mix aus Stromsparen und eigener Stromerzeugung erreichen. So werden wir zum Beispiel am Institut die Kapazitäten unserer Photovoltaikanlagen um 2 300 Kilowattpeak (kWp) erweitern und dafür rund 3,6 Millionen Euro investieren. Für das Monitoring aller Maßnahmen haben wir ein Energiemanagement eingeführt: 2023 hat das Fraunhofer ISE dafür erfolgreich die Zertifizierung nach DIN EN ISO 50001:2018 absolviert.

Unser Engagement deckt sich mit der [Strategie der Fraunhofer-Gesellschaft](#). Diese plant, ihren Forschungsbetrieb bis 2045 klimaneutral zu gestalten und hat für Organisation und Umsetzung die Initiative »Fraunhofer klimaneutral« ins Leben gerufen. Auf dem Weg zur Klimaneutralität will die Gesellschaft in einem ersten Schritt bis 2030 ihre CO<sub>2</sub>-Emissionen um 55 Prozent reduzieren und unvermeidliche Emissionen kompensieren. Dazu wurden die eigenen betrieblichen Emissionen erfasst sowie Einsparpotenziale und Handlungsbedarfe identifiziert.

## Monitoring und Reporting

Das Fraunhofer ISE berichtet regelmäßig über seine [Nachhaltigkeitsaktivitäten](#) und veröffentlicht zudem in seinem Nachhaltigkeitsbericht Daten und Prozesse transparent und systematisch gemäß dem Standard der Global Reporting Initiative. Die erfolgreiche Teilnahme am IÖW/Future-Ranking der Nachhaltigkeitsberichte 2021 sowie die Nominierung für den Deutschen Nachhaltigkeitspreis im Juli 2023 in der Kategorie »Bildung und Forschung« sind für uns ein Ansporn, den eingeschlagenen Weg in Richtung einer umfassenden Nachhaltigkeit weiterzugehen.

# Strategie und Geschäftsbereiche





Regelmäßige Infos zu Meilensteinen unserer Forschung bieten unsere Newsletter!



# Inhalt

- Stärkung der deutschen und europäischen Industrie erhöht die Resilienz . . . . .** 24
- Neue Organisationsstruktur und Außendarstellung . . . . .** 26
- Für eine resiliente, europäische Photovoltaik-Produktion . . . . .** 28
- Geschäftsfelder . . . . .** 30
  - Photovoltaik – Materialien, Zellen, Module . . . . . 30
  - Photovoltaik – Produktionstechnologie und Transfer . . . . . 32
  - Solkraftwerke und Integrierte Photovoltaik . . . . . 34
  - Leistungselektronik und Stromnetze . . . . . 36
  - Elektrische Energiespeicher . . . . . 38
  - Klimaneutrale Wärme und Gebäude . . . . . 40
  - Wasserstofftechnologien . . . . . 42
  - Systemintegration . . . . . 44
- FuE-Infrastruktur . . . . .** 46
- Akkreditierte Labors . . . . .** 48

# Stärkung der deutschen und europäischen Industrie erhöht die Resilienz

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



**In Politik, Wirtschaft, Medien und Gesellschaft wurde in den vergangenen Monaten sehr um die Umsetzung der Energiewende gerungen. Wie hat sich das auf die Arbeit des Fraunhofer ISE ausgewirkt?**

*Bett:* »Unser Institut arbeitet seit vielen Jahren an technologischen Lösungsbeiträgen für eine erfolgreiche Umsetzung der Energiewende. Insofern kommt es uns entgegen, wenn das Thema zunehmend in der Politik und Öffentlichkeit ankommt. Die erforderlichen Technologien sind grundsätzlich vorhanden, aber bei der industriellen Umsetzung gibt es noch Herausforderungen. Politik und Regulatorik sind in hohem Maß gefordert, die richtigen Rahmenbedingungen zu setzen.«

*Henning:* »Ganz konkret möchte ich beispielhaft das Thema Wärmepumpen nennen, an dem wir seit vielen Jahren forschen, weil wir überzeugt sind, dass diese eine Schlüsseltechnologie für die Dekarbonisierung des Wärmesektors darstellen. Durch die Novellierung des Gebäudeenergiegesetzes waren sie im vergangenen Jahr sehr im Fokus. Es zeigte sich allerdings, dass die Einführung einer solchen, eigentlich gut funktionierenden Technologie in der Breite nicht einfach ist. Das Fraunhofer ISE kann dabei aber unterstützen, indem wir angepasste, technisch gut anschlussfähige Lösungen für unterschiedliche Anwendungsfälle, etwa für Mehrfamiliengebäude, entwickeln.«

**Nach der Corona-Pandemie sowie an der »Gaskrise« und der Umsetzung der Energiewende wird deutlich, wie sehr Deutschland abhängig ist von internationalen Lieferanten. Wie kritisch ist das?**

*Bett:* »Bei fast allen Technologien haben wir eine gewisse globale Abhängigkeit. Kritisch ist, dass sie sich zunehmend auf China fokussiert. Deshalb ist das Thema Resilienz im Technologiebereich als Basis für die Ausgestaltung der Energiewende jetzt so wichtig. Man muss ganz genau analysieren, wo im Einzelfall die Komponenten und Produkte herkommen. Kann man das auf dem Weltmarkt an drei oder vier Stellen einkaufen oder eben nur an einer? Das prominenteste Beispiel ist die Photovoltaik. 99 Prozent der für die PV-Module erforderlichen Siliziumwafer werden in China hergestellt. Damit besteht weltweit eine sehr kritische Abhängigkeit, die aber auch eine Chance für den Aufbau einer PV-Fertigung in Europa bietet. Wenn wir dagegen die Wärmepumpen anschauen, gibt es bei den Kältemittelverdichtern zwar auch eine hohe Abhängigkeit von Asien, allerdings von verschiedenen Ländern. Bei den Batteriezellen, wo es derzeit noch hohe Abhängigkeit von China gibt, war in Deutschland noch wichtiges technologisches Know-how vorhanden und vor allem der politische Wille dafür da, die Produktion wieder hier in Deutschland zu etablieren. Beim Produktionsaufbau muss man sich nicht unbedingt immer gegen China abgrenzen, sondern man kann auch in Kooperation gemeinsam voranschreiten.«

**Gibt es noch weitere Technologien, auf die man ein besonderes Augenmerk legen sollte?**

*Henning:* »Besonders aufmerksam müssen wir aktuell beim Wasserstoff sein. Da sind wir in einer früheren Phase der Marktentwicklung. Deshalb müssen die Weichen jetzt richtig gestellt und das Know-how in Deutschland und Europa etabliert werden, um Technologiekompetenz oder sogar Technologieführerschaft zu erzielen und gar nicht erst in kritische Abhängigkeiten zu geraten. Wenn der Hochlauf politisch flankiert sichergestellt ist, ergeben sich große Chancen. Technologieentwicklung funktioniert dann besonders gut, wenn Heimatmärkte diese direkt nutzen, Anwendung und Skalierung vor Ort umgesetzt werden. Generell finde ich es wichtig, nicht nach Autarkie zu streben. Das wird nicht gelingen, weil wir, selbst wenn die Herstelltechnologie

hier ist, immer noch von Rohstofflieferungen abhängig sind. Insofern ist das Thema Resilienz breiter zu sehen: Diversifikation von Lieferquellen und Lieferketten sowie Technologie-souveränität für die Schlüsseltechnologien. Dies bedeutet, über wichtige Kompetenzen in Europa zu verfügen – und das nicht nur in der Wissenschaft, sondern auch in der Wirtschaft – um eigenständig handlungsfähig zu bleiben.«

### Wie kann das Fraunhofer ISE die heimische Industrie dabei konkret unterstützen?

*Bett:* »Technologisch hat das Fraunhofer ISE an vielen Stellen Entwicklungen vorangetrieben und steht mit an der Weltspitze. Wir verfügen über umfangreiche Erfahrung. Jetzt geht es darum, den Transfer gemeinsam mit der Industrie zu organisieren. Das heißt, wir können die Industrie sicher sehr gut bei den aktuellen technologischen Fragestellungen unterstützen, teilweise auch dabei, Geschäftsmodelle zu entwickeln, und wir können Vernetzung organisieren, was sehr wichtig ist, wenn man große Unternehmungen aufbauen will.«

*Henning:* »Wir haben uns auch organisatorisch neu aufgestellt, mit dem Ziel, Gesamtlösungen noch effektiver und erfolgreicher umsetzen zu können. So sind die Themen PV-Kraftwerke, Leistungselektronik und Batteriespeicher jetzt alle im neu geschaffenen Bereich »Strom« zusammengefasst, um alle Kernkompetenzen für die Stromwende auf der technologischen Seite zusammenzuführen.«

### Wie kann es gelingen, dass die europäischen Hersteller international wettbewerbsfähig sein können, auch im Hinblick auf die oft günstigen Preise in Asien?

*Bett:* »'Billig produzieren' heißt häufig, dass an Faktoren wie CO<sub>2</sub>-Emissionen und ihren Auswirkungen auf das Klima, oder an sozialen Aspekten wie menschenwürdigen Arbeitsbedingungen, kein Preisschild dran ist und damit nicht die wahren Kosten abgebildet werden. Das Bewusstsein dafür muss in unserer Gesellschaft sicherlich noch breiter verankert werden. Am Fraunhofer ISE haben wir uns entschlossen, das Thema Nachhaltigkeit gesamthaft und strategisch zu betrachten. Deshalb schauen wir uns verstärkt Lebenszyklusanalysen und die gesamten Abhängigkeiten an, die ja doch sehr komplex sind. Darauf bauen wir unsere Forschung auf. Zudem wollen wir Technologien so entwickeln, dass sie kreislauffähig sind.«

*Henning:* »Hinzu kommt, dass die Automatisierung nicht am Ende ist. Unser Anspruch ist, in der gesamten Wertschöpfung modernste Verfahren der Digitalisierung einschließlich Methoden der künstlichen Intelligenz anzuwenden, um Kostensenkungspotenziale zu erschließen. Ein weiterer, wichtiger Aspekt ist die Ressourcenminimierung. Wir wollen mit der Industrie Prozesse entwickeln, die möglichst wenig Energie und Material benötigen und eine tendenziell vollständige Wiederverwendung aller Komponenten und Materialien erlauben – und dies nach Möglichkeit ohne höhere Kosten.«

### Gibt es weitere Aspekte, bei denen Vorteile für lokale Industrien bestehen?

*Henning:* »Vorteile bestehen beispielsweise bei der Integrierten Photovoltaik. Module werden dafür in kleineren Stückzahlen hergestellt, die auf ganz spezifische Anforderungen im Gebäude oder in der Landwirtschaft optimiert werden. Hier wird natürlicherweise die Wertschöpfung stärker vor Ort stattfinden. Auch bei Gesamtlösungen vor Ort ist es naheliegend, dass diese lokal entwickelt werden. Ein Beispiel ist die Entwicklung von Klimaneutralitätskonzepten für Produktionsstandorte. Das ist etwas, was wir mit unserem neugeschaffenen Querschnittsthema »Systemintegration« am Institut gezielt unterstützen wollen. Diese kann sich aus allen Kompetenzen, die im Institut verteilt vorhanden sind, bedienen, um maßgeschneiderte Lösungen für kommerzielle Endkunden – zum Beispiel die Wohnungswirtschaft oder Betreiber von Industrieliegenschaften – zu entwickeln.«



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

### Welche konkreten Initiativen hat sich das Fraunhofer ISE für das nächste Jahr vorgenommen?

*Bett:* »Es bleibt für uns wichtig, Einzelkompetenzen weiterzuentwickeln und technologisch an der vordersten Front zu sein. Aber wir wollen stärker umfassende, kundenorientierte Systemlösungen anbieten. Dafür sind wir als Institut sehr gut aufgestellt, weil wir so eine breite Kompetenzbasis haben. Darüber hinaus können wir auf unser Netzwerk in die Fraunhofer-Gesellschaft und in andere Forschungseinrichtungen zugreifen. Dies ist etwas, was unsere Kunden sehr schätzen. Zentral wird für unsere FuE-Arbeit auch der Nachhaltigkeitsanspruch sein. So sehen wir das Fraunhofer ISE für die Zukunft gut aufgestellt.«

# Neue Organisationsstruktur und Außendarstellung

---

Die Energiewende erfordert eine umfassende Umgestaltung der Energieversorgung von der Bereitstellung über die Verteilung und Speicherung bis zur Nutzung. Das Fraunhofer ISE ist seit vielen Jahrzehnten an der technologischen Entwicklung von Schlüsselkomponenten für diesen Umbau des Energiesystems beteiligt, von Lösungen für die Photovoltaik über Netztechnik und Leistungselektronik, elektrische und thermische Energiespeicher, Techniken zur Herstellung und Nutzung von Wasserstoff bis hin zu Wärmepumpen. Technologische Weiterentwicklungen zur Verbesserung der Performance und Senkung der Kosten spielen auch zukünftig eine wichtige Rolle, wobei Fragen zur nachhaltigen Herstellung und der effizienten Ressourcennutzung an Bedeutung gewinnen. Nachhaltigkeit wird daher ein Kernelement unserer Institutsstrategie. Das bedeutet zum einen, Nachhaltigkeitsfragen von Anfang an in unsere Forschungs- und Entwicklungsarbeiten einzubeziehen und zum anderen, den Betrieb unseres Instituts kontinuierlich im Sinne sinkender Klima- und Umweltwirkungen weiterzuentwickeln.

Mit fortschreitender technologischer Entwicklungsreife nimmt die praktische Umsetzung für den Erfolg der Energiewende massiv an Bedeutung zu. So haben politische Entscheidungen jüngst den Rahmen für den Umbau der Wärmeversorgung des Gebäudesektors geschaffen, was zu einer beschleunigten Implementierung neuer Lösungskonzepte führen wird. Und der weitere Zubau erneuerbarer Energien für die Stromerzeugung hat erhebliche Auswirkungen auf die Stromnetze. Systemische Lösungen unter Einbeziehung von Leistungselektronik und Speichern auf verschiedenen Netzebenen sind

deshalb erforderlich, um weiterhin eine stabile und sichere Stromversorgung zu garantieren. Um diesen Herausforderungen optimal zu begegnen, haben wir unsere Organisationsstruktur angepasst und vier große wissenschaftliche Bereiche geschaffen:

- **Photovoltaik**  
(Leitung Prof. Dr. Stefan Glunz, PD Dr. Ralf Preu)
- **Strom**  
(Leitung: Dr. Harry Wirth)
- **Wärme und Gebäude**  
(Leitung: Dr. Peter Schossig)
- **Wasserstofftechnologien**  
(Leitung kommissarisch: Ulf Groos, Dr. Achim Schaadt, Dr. Tom Smolinka, Robert Szolak)

In Bereich »Photovoltaik« befinden sich nun Zell- und Modulentwicklung unter einem Dach. Die Zusammenführung der photovoltaischen Kraftwerke mit Leistungselektronik, Netztechnik und Batteriespeichertechnik im Bereich »Strom« stärkt unser Angebot für systemische Lösungen im Bereich der zukünftigen Stromversorgung. Mit dem Bereich »Wärme und Gebäude« bieten wir umfassende Lösungen für die Energiewende und mit dem Bereich »Wasserstofftechnologien« Angebote für sämtliche Fragestellungen der sich dynamisch entwickelnden Industrie in diesem Themenfeld. Diese Aufstellung harmoniert hervorragend mit den Missionen »Stromwende«, »Wärmewende« und »Wasserstoff« des jüngst veröffentlichten achten Energieforschungsprogramms des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz.



Das Fraunhofer ISE entwickelt Gesamtlösungen für klimaneutrale Gebäude, Quartiere und Kommunen. Im Bild zu sehen ist das Freiburger Quartier Gutleutmatte, in dessen Nahwärmenetz dezentrale Solarthermieanlagen integriert wurden.

Daneben haben wir mit der Programmlinie »Übergreifende Systemintegration« ein neues Strukturelement entwickelt, das von Prof. Dr. Christof Wittwer geleitet wird. In dieser Programmlinie werden umfassende Lösungsansätze für zukunftsfähige Energieversorgungssysteme unter Rückgriff auf das Know-how der vier stärker technologisch orientierten Bereiche erforscht und gemeinsam mit Kunden entwickelt. Damit wollen wir der steigenden Nachfrage aus der Wirtschaft und dem öffentlichen Sektor nach Gesamtlösungen für klimaneutrale Gebäude, Quartiere, Kommunen und Industrieliegenschaften nachkommen und die Umsetzung in Reallaboren, Living Labs und Demonstrationsvorhaben von der Konzeptentwicklung bis zur Optimierung im Betrieb ganzheitlich wissenschaftlich begleiten.

Im Sinne einer noch besseren Kundenorientierung haben wir auch unsere Geschäftsfeldstruktur überarbeitet. Dieser Jahresbericht ist nach den acht neuen Geschäftsfeldern strukturiert, die ab dem 1. Januar 2024 unsere Außerdarstellung bilden:

- Photovoltaik – Materialien, Zellen, Module
- Photovoltaik – Produktionstechnologie und Transfer
- Solarkraftwerke und Integrierte Photovoltaik
- Leistungselektronik und Stromnetze
- Elektrische Energiespeicher
- Klimaneutrale Wärme und Gebäude
- Wasserstofftechnologien
- Systemintegration



Ab 2024 richtet das Fraunhofer ISE seine Außerdarstellung an acht neuen, marktorientierten Geschäftsfeldern aus.

# Für eine resiliente, europäische Photovoltaik-Produktion

Die Europäische Kommission hat in ihrem »Net Zero Industry Act« (NZIA) das Ziel klar vorgegeben: Im Bereich der Photovoltaik sollen 40 Prozent der im Jahr 2030 benötigten Kapazität in Europa produziert werden. Entsprechend wird der Ausbau der Photovoltaik-Produktion vorangetrieben und die europäische Solarindustrie versucht, wieder zu alter Stärke zurückzufinden. Am Fraunhofer ISE begleiten wir diesen Prozess mit unserer Expertise und arbeiten eng mit unseren Industriepartnern daran, vorhandene Produktionskapazitäten zu stärken und neue aufzubauen. Seit über 20 Jahren unterstützen wir europäische Produzenten von Solarzellen und -modulen mit unserem Know-how. 2018 hat das Fraunhofer ISE in einem White Paper den Erhalt der technologischen Souveränität eingefordert. »Aus unserer Sicht ist es nicht zuletzt aus Gründen der Eigenständigkeit und politischen Unabhängigkeit notwendig, eine Photovoltaik-Produktion aufzubauen und die komplette Produktionskette in Europa zu betreiben«, fasst Institutsleiter Prof. Dr. Andreas Bett die Stellungnahme zusammen.

## Günstige politische Rahmenbedingungen schaffen

Allerdings sind die Rahmenbedingungen schwierig, da China den PV-Markt sowie die Wertschöpfungskette für die Silizium-Photovoltaik dominiert, die [über 95 Prozent des Photovoltaik-Markts](#) ausmacht. Damit die Abhängigkeit sinken kann, ist es erforderlich, politische Rahmenbedingungen zu schaffen, die einen fairen Wettbewerb ermöglichen. So sind die europäischen Verbände European Solar Manufacturing Council (ESMC) und Solar Power Europe (SPE) über die Initiative ESIA (European Solar Photovoltaic Industry Alliance) gemeinsam aktiv, um eine europäische PV-Produktion entlang der Wertschöpfungskette zu fordern. Auch der Bundesverband Solarwirtschaft hat einen Vorschlag erarbeitet: Er schlägt Resilienz-Ausschreibungen im Rahmen der EEG-Vergütung vor, bei denen je nach Anteil europäischer Produktion eine höhere Vergütung erfolgt.

Zahlreiche Maßnahmen werden nötig sein, um wichtige Technologien und Produktionen in Europa anzusiedeln und damit eine größere Resilienz für den Umbau des Energiesystems aufzubauen.

*Das Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen des Fraunhofer ISE in Freiburg.*



### Wertschöpfungskette

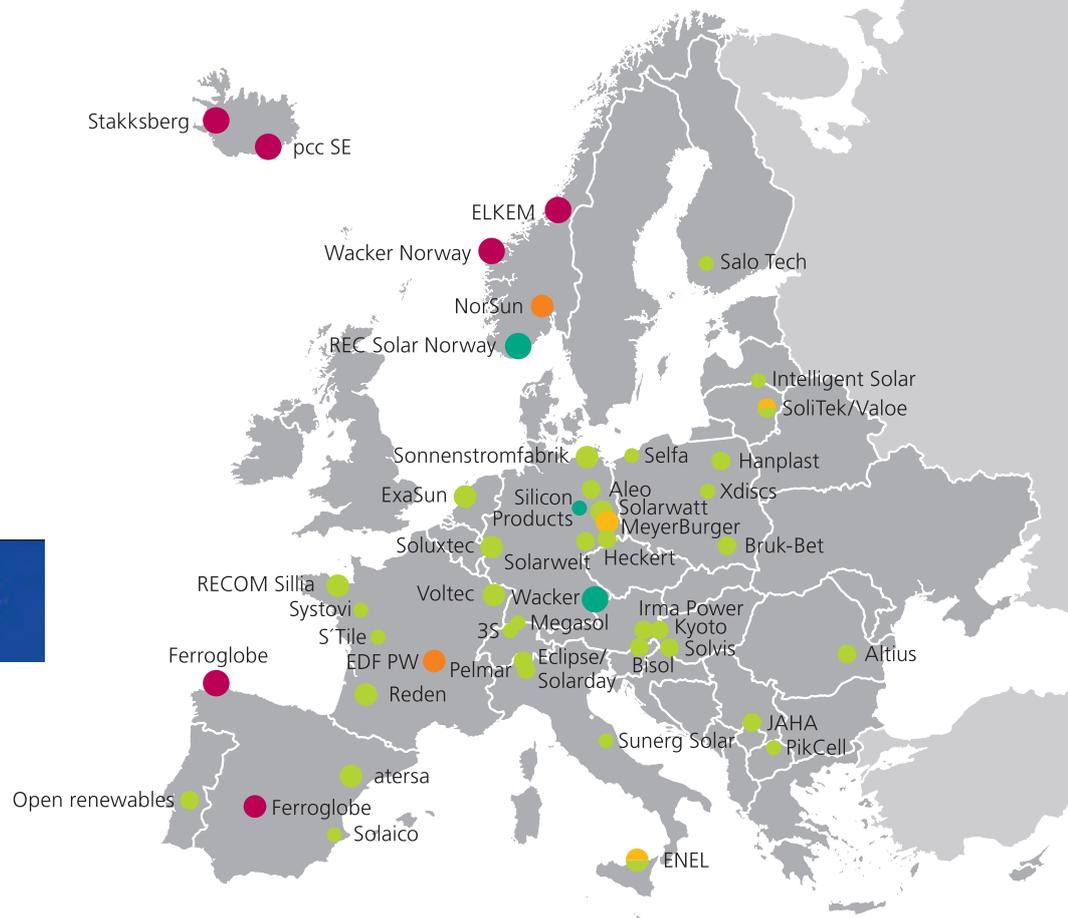
- mg-Si
- Poly-Si
- Ingot/Wafer
- Solarzelle
- Modul



### Fabrikgröße

#### (Produktionskapazität)

- > 1 GW<sub>p</sub>
- > 500 MW<sub>p</sub>
- > 100 MW<sub>p</sub>
- > 50 MW<sub>p</sub>



Unternehmen entlang der PV-Wertschöpfungskette in Europa.

### Das Fraunhofer ISE – der Partner der Industrie

Das Fraunhofer ISE unterstützt schon jetzt intensiv die Hersteller mit FuE-Leistungen und kooperiert mit Unternehmen, die Produktionskapazitäten aufbauen. So werden wir zum Beispiel auf Basis einer im Sommer 2023 unterzeichneten strategischen Kooperationsvereinbarung das Unternehmen [HoloSolis](#) bei der Technologieauswahl und Fabrikplanung in der konzeptionellen Design- und Bauphase unterstützen. Das Unternehmen plant den Aufbau einer Produktionslinie für PV-Solarzellen und -module in der Nähe der deutsch-französischen Grenze. Die Fertigung soll 2025 in Betrieb gehen und bei voller Auslastung eine Produktionskapazität von fünf Gigawatt pro Jahr haben.

Wir forschen zudem an einer neuen Generation der Solarzelle und entwickeln Modultypen, die Europa wettbewerbsfähig machen. Hersteller von Modulen und Produktionsanlagen unterstützen wir in unserem modern ausgestatteten Produktionslabor [Module-TEC](#), in dem wir unterschiedlichste Modulgrößen und Designs realisieren und jedes Modul individuell gestalten können. Gemeinsam mit der Heckert Solar GmbH haben wir etwa ein PV-Modul basierend auf M12-Halbzellen mit einem Wirkungsgrad von 20,5 Prozent entwickelt. Das Fraunhofer ISE übernahm die Konzeption, die Vorentwicklung und die Herstellung der ersten Modulprototypen.

Besonders wichtig ist uns am Fraunhofer ISE die Nachhaltigkeit der Produktion, also den Energieverbrauch zu senken und Rohstoffe effizient einzusetzen. Der Erfolg der Wiederansiedelung

der europäischen Photovoltaik-Produktion hängt maßgeblich von der Verfügbarkeit kritischer Rohstoffe ab. Daher haben wir die zirkuläre Wertschöpfung als Ziel in unserer Institutsstrategie verankert. Das umfasst die Wiederverwertung von Materialien und Komponenten ebenso wie die Rückführung in die Materialkreisläufe. Beispielhaft zeigen sich unsere Ambitionen an drei Institutsausgründungen: Das Unternehmen [NexWafe](#) adressiert den Markt für hochwertige Wafer und hat sich das Up-Scaling der EpiWafer-Technologie zum Ziel gesetzt. Die [HighLine Technology GmbH](#) ermöglicht mit ihrer proprietären Dispensingtechnologie den ressourcenschonenden Einsatz von Pasten für die Metallisierung. Und das Start-up [PV2+](#) ist mit einem Galvanikverfahren zum Ersatz von Silber durch Kupfer für Solarzellenkontakte erfolgreich an den Start gegangen.

### Ausblick

Die Europäische Kommission wie auch die nationalen Regierungen sind gefordert, die Produktion von Photovoltaik entlang der Wertschöpfungskette zu fördern. Das Fraunhofer ISE geht diesen Weg mit und baut daher seine Kapazitäten für die Modulentwicklung im Module-TEC aus. Ende Februar 2024 eröffnen wir unser neues Produktionslabor in der ehemaligen »Solarfabrik« in Freiburg. Vier Millionen Euro wurden in den Standort investiert, um bestehende und neue Produktionsanlagen für Verbindungstechniken und Lamination in einer Halle aufzustellen. So können wir noch effizienter die industriennahe Forschung zur Serienproduktion von Solarmodulen unterstützen und dazu beitragen, eine resiliente Photovoltaik-Produktion in Europa aufzubauen.

# Photovoltaik – Materialien, Zellen, Module

## Position im Markt

Hohe Konversionswirkungsgrade und damit niedrige photovoltaische Stromgestehungskosten können nur mit optimalen und kosteneffizienten Materialien erzielt werden. Für Silizium, organische sowie III-V- und Perowskit-Halbleiter erreichen wir am Fraunhofer ISE durch tiefgehende Analysen und optimierte Prozesse sehr gute elektronische Eigenschaften. Hierauf aufbauend entwerfen wir mithilfe von Simulationstools optimierte Solarzellenarchitekturen und setzen diese in unseren Labors um. So entstehen bahnbrechende Zellarchitekturen wie die von uns entwickelte TOPCon-Siliziumsolarzelle, die sich als industrieller Standard weltweit durchgesetzt hat.

Da sich die Siliziumsolarzelle ihrem theoretischen Wirkungsgradlimit nähert, entwickeln wir die nächste Solarzellengeneration auf der Basis von Mehrfachsolarzellen. Hierbei nutzen wir unsere langjährigen Erfahrungen mit III-V-Halbleitern, um zukunftsweisende Tandemsolarzellen mit neuen und potenziell kostengünstigeren Halbleitern wie Perowskiten produzieren zu können. Bei der Modulherstellung setzen wir auf neue Topologien wie das Matrix-Schindeln, das in Verbindung mit unserer MorphoColor®-Technologie besonders ästhetische Ergebnisse erzielt. Zudem forschen wir an Tandemmodulen, die höchste Modulwirkungsgrade bei Festinstallation oder bei Konzentration in nachgeführten Systemen erlauben.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	165
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	84
 Vorträge und Konferenzbeiträge	90
 Patent-Erstanmeldungen	3

## Leitung

Prof. Dr. Stefan Glunz, Telefon +49 761 4588-5191

## Themen in diesem Geschäftsfeld

### Siliziummaterial und Halbleitersubstrate

Dr. Charlotte Weiss, Telefon +49 761 4588-5591

### Siliziumsolarzellen und -module

PD Dr. Ralf Preu, Telefon +49 761 4588-5260

### Siliziumbasierte Tandemsolarzellen und -module

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

### Perowskit-Dünnschichtphotovoltaik

Dr. Markus Kohlstädt, Telefon +49 761 203-96796

### Organische Photovoltaik

Dr. Uli Würfel, Telefon +49 761 203-4796

### III-V-Solarzellen, Module und konzentrierende Photovoltaik

Dr. Frank Dimroth, Telefon +49 761 4588-5258

### Photonische und leistungselektronische Bauelemente

Dr. Henning Helmers, Telefon +49 761 4588-5094



**Mit der Entwicklung von Perowskit-Silizium-Mehrfachsolarzellen öffnen wir die Tür zur nächsten Photovoltaik-Generation.«**



**Maryam Heydarian  
und Mina Heydarian**  
Doktorandinnen Perowskit-  
Silizium-Mehrfachsolarzellen

Mehr Informationen

**Geschäftsfeld**



**Publikationen**



**Projekte**



# Photovoltaik – Produktionstechnologie und Transfer

## Position im Markt

Die nachhaltige Produktion photovoltaischer Komponenten erfordert eine hohe Kenntnis ihrer Wirkungsweise und Herstellung – hier greift unsere Expertise in der Produktionstechnologie. Die aktuellen Prozesstechnologien sind vielfältig und umfassen unter anderem nasschemische Prozesse, epitaktische Verfahren zur Materialherstellung oder Laser- und Druckverfahren zur Solarzellenherstellung. Hinzu kommen Beschichtungsverfahren sowie Verbindungstechnologien und Laminationstechniken für die Modulherstellung. Der Einsatz von Prozess- und Charakterisierungsgeräten muss dabei eine hohe Leistungsfähigkeit, Reproduzierbarkeit und Ausbeute für die Produktion hoch-effizienter Solarzellen und Module gewährleisten.

In unseren Großlabors entwickeln wir innovative Ansätze vom Proof-of-Concept bis zum Machbarkeitsnachweis in Kleinserien mit bewährten und neuartigen Produktionsanlagen. Unsere techno-ökonomischen und ökologischen Analysen ermöglichen fundierte Investitionsentscheidungen für industrielle Hersteller, etwa hinsichtlich der Wahl photovoltaischer Komponenten sowie der hierfür notwendigen Materialien und Geräte. Diese Analysen bilden auch die Basis für unseren Technologietransfer an heutige und zukünftige Hersteller photovoltaischer Komponenten. Unsere erfahrenen Wissenschaftlerinnen und Ingenieure unterstützen unsere Partner hierbei von der Machbarkeitsstudie bis zur Produktion.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	313
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	84
 Vorträge und Konferenzbeiträge	90
 Patent-Erstanmeldungen	2

## Leitung

PD Dr. Ralf Preu, Telefon +49 761 4588-5260

## Themen in diesem Geschäftsfeld

### Materialtechnologien

Dr. Charlotte Weiss, Telefon +49 761 4588-5591

### Metrologie und Simulationsmethoden

Dr. Martin Schubert, Telefon +49 761 4588-5660

### Beschichtungstechnologien und Hochtemperaturprozesse

Dr. Marc Hofmann, Telefon +49 761 4588-5051

### Nass- und trockenchemische Verfahren

Dr. Martin Zimmer, Telefon +49 761 4588-5479

### Laser- und Drucktechnologien

Dr. Jan Nekarda, Telefon +49 761 4588-5563

### Verbindungs- und Einkapselungstechnologien

Dr. Holger Neuhaus, Telefon +49 761 4588-5825

### Künstliche Intelligenz und Datenmanagement

Dr. Stefan Rein, Telefon +49 761 4588-5271

### Technologiebewertung und -transfer

Dr. Jochen Rentsch, Telefon +49 761 4588-5199



**Unsere äußerst produktiven und schonenden Laserprozesse ermöglichen einen effizienten Einsatz hochverfügbarer und günstiger Materialien in der PV-Produktion.«**



**Jan Paschen und Anna Münzer**  
Doktorand und Doktorandin  
Laserprozessstechnologie

Mehr Informationen

Geschäftsfeld



Publikationen



Projekte



# Solarkraftwerke und Integrierte Photovoltaik

## Position im Markt

Wir forschen, damit innovative, qualitativ hochwertige und kostengünstige Solaranlagen auf allen geeigneten Flächen entstehen. Hierfür entwickeln wir Methoden und Technologien rund um PV-Module sowie Solarkraftwerke und ihre Anwendungen. Die Integration von Solartechnologie in den urbanen Raum, in Verkehrsinfrastruktur sowie in Agrar- und Wasserflächen erschließt ein riesiges zusätzliches Flächenpotenzial. Durch den hohen Anteil erneuerbarer Energien wird die solare Leistungsprognose immer wichtiger. Deswegen entwickeln wir Prognosemodelle für zuverlässige Vorhersagen, abhängig von der PV-Nutzungsdauer sowie des PV-Flächenumfangs.

Entlang der Phasen des Fraunhofer ISE-Qualitätszirkels – Development, Engineering, Procurement, Commissioning und Operation – gewährleisten wir eine umfassende Qualitätssicherung. Unter Einbeziehung von Standort- und Klimafaktoren untersuchen wir mit unseren Simulations-Tools das Potenzial und die Machbarkeit neuer Technologien. Unser Team charakterisiert die Leistung neuer Modultechnologien und prüft deren Zuverlässigkeit in Labor und Feld. Unsere Leistungen decken dabei auch solarthermische Kraftwerke und deren Kombination mit Photovoltaik und Power-to-X-Technologien ab.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	145
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	22
 Vorträge und Konferenzbeiträge	64

## Leitung

Dr. Anna Heimsath, Telefon +49 761 4588-5944

## Themen in diesem Geschäftsfeld

### Modulanalyse und Zuverlässigkeit

Daniel Philipp, Telefon +49 761 4588-5414

### Photovoltaische Kraftwerke

Dr. Anna Heimsath, Telefon +49 761 4588-5944

### Integrierte Photovoltaik

Dr. Harry Wirth, Telefon +49 761 4588-5858

### Solarthermische Kraftwerke

Dr. Gregor Bern, Telefon +49 761 4588-5906

### Solare Energiemeteorologie

Dr. Elke Lorenz, Telefon +49 761 4588-5015



## Doppelte Flächennutzung bietet Landwirtschaft, Industrie und Kommunen vielfältige Optionen für die Stromerzeugung vor Ort.«



**Dr. Anna Heimsath**, Geschäftsfeldleiterin Solarkraftwerke und Integrierte Photovoltaik, und **Oliver Hörnle**, Projektleiter Agri-Photovoltaik

Mehr Informationen

Geschäftsfeld



Publikationen



Projekte



# Leistungselektronik und Stromnetze

## Position im Markt

Die Integration erneuerbarer Energien in unserem Energiesystem nimmt zu – und damit die Elektrifizierung der Energieversorgung in den Sektoren Strom, Wärme und Mobilität. Dabei durchläuft der Strom auf dem Weg von der Erzeugung bis zur Endnutzung zahlreiche leistungselektronische Wandlungsstufen. Folglich steigt die mit dem Zubau der erneuerbaren Energien verbundene Verbreitung von Stromrichtern und digitalen Systemen in allen Marktsegmenten an.

Mithilfe neuester Bauelemente und Technologien – z. B. auf Basis von SiC- und GaN-Halbleitern – können auf Systemebene wesentliche Vorteile erzielt werden. Diese sind zwingend notwendig, um die für die Energiewende gesteckten Ausbauziele mit den verfügbaren und erschließbaren Rohstoffressourcen zu ermöglichen. Auch die Interoperabilität, Digitalisierung und Modellierung von Energiesystemen gewinnt zunehmend an Bedeutung. In einem dezentral organisierten Stromnetz ohne konventionelle Kraftwerke werden zukünftig Stromrichter für die Systemstabilität verantwortlich sein. Aber auch die Erweiterung der Lasten um netzdienliche Funktionen und das Energiemanagement werden eine größere Rolle spielen. Hierbei unterstützen wir unsere Industriepartner sowohl mit unserer Expertise als auch mit unserer Infrastruktur im »Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze«.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	102
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	5
 Vorträge und Konferenzbeiträge	24

## Leitung

Christian Schöner, Telefon +49 761 4588-2078

## Themen in diesem Geschäftsfeld

### **Stromrichter**

Stefan Reichert, Telefon +49 761 4588-5476

### **Hochleistungselektronik und Systemtechnik**

Andreas Hensel, Telefon +49 761 4588-5842

### **Digitaler Netzanschluss**

Marco Mittelsdorf, Telefon +49 761 4588-5446

### **Netzplanung und Netzbetrieb**

Dr. Bernd Wille-Haußmann, Telefon +49 761 4588-5443

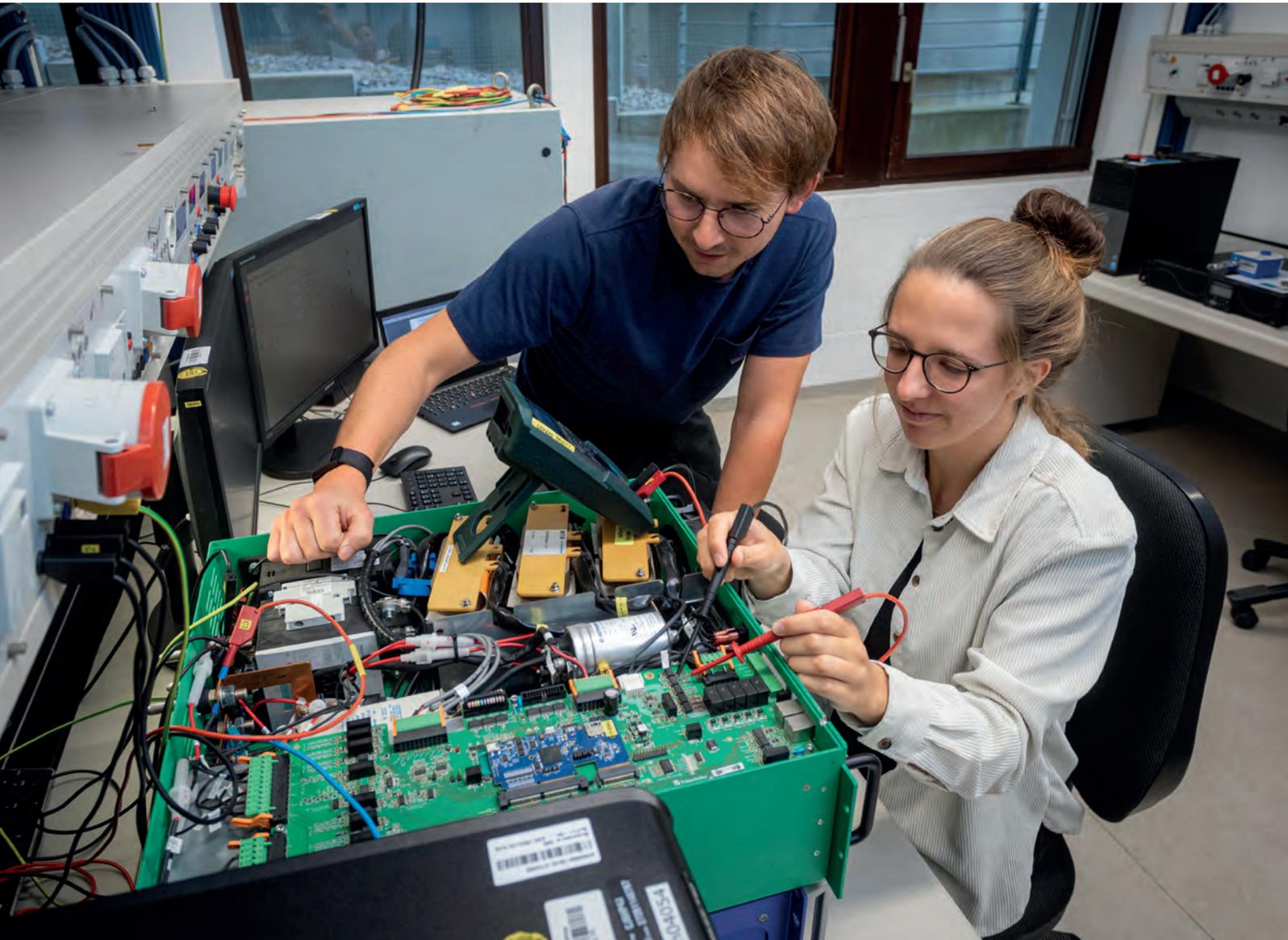
### **Stromrichterbasierte Netze und Systemstabilität**

Roland Singer, Telefon +49 761 4588-5948





**Wir forschen an wichtigen Schlüsseltechnologien für eine erfolgreiche Sektorenkopplung.«**



**Philipp Ernst**, Projektleiter  
»Verbundnetz Stabil«, und  
**Franziska Hans**, wissenschaftliche Mitarbeiterin

Mehr Informationen

Geschäftsfeld



Publikationen



Projekte



# Elektrische Energiespeicher

## Position im Markt

Die Energiewende sowie eine nachhaltige Transformation des Mobilitätssektors können nur mithilfe sicherer, zuverlässiger und leistungsfähiger Batteriespeicher gelingen. Der Bedarf an entsprechenden Batterietechnologien wird daher exponentiell ansteigen. Um die gesteckten Ziele zu erreichen, wird auch eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft nötig sein, wie sie die europäische Batterieverordnung adressiert. Die Digitalisierung spielt in den Bereichen Produktion, Nutzungsphase und End-of-life (EOL) in diesem Zusammenhang eine zentrale Rolle. Auch die im Rahmen des Batteriepasses definierten Anforderungen an Batteriemanagementsysteme – etwa hinsichtlich der Transparenz von Zustand und Restlebensdauer – treiben diese Entwicklung voran.

In unserem »Zentrum für Elektrische Energiespeicher« forschen wir an der nächsten Generation von Lithium-Ionen-Batterien sowie an vielversprechenden Alternativen wie Zink-Ionen- oder Natrium-Ionen-Technologien. Dabei betrachten wir die gesamte Wertschöpfungskette – von Materialien und Zellen über die Batteriesystemtechnik bis hin zu vielfältigen Speicheranwendungen. In unserer Laborinfrastruktur im Freiburger »Haidhaus« bieten wir umfangreiche wissenschaftliche Tests und Prüfungen auf Zell- sowie Systemebene, aber auch modernste Charakterisierungsverfahren an.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	88
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	4
 Vorträge und Konferenzbeiträge	26
 Patent-Erstanmeldungen	2

## Leitung

Dr. Daniel Biro, Telefon +49 761 4588-5600

## Themen in diesem Geschäftsfeld

### Batteriematerialien und -zellen

Dr. Lea Eisele, Telefon +49 761 4588-2585

### Batteriesystemtechnik

Dr. Nina Kevlishvili, Telefon +49 761 4588-2042

### Produktionstechnologie für Batterien

Marc Kissling, Telefon +49 761 4588-5046

### Batterieintegration und -betriebsführung

Nils Reiners, Telefon +49 761 4588-5281

### Technologiebewertung für Batterien

Manuel Bergmann, Telefon +49 761 4588-2818





**Batterien sind ein zentraler Schlüssel für eine nachhaltige und versorgungssichere Strombereitstellung.»**



**Dr. Moritz Kroll**, stellvertretender Leiter »Lab Battery Testing«, und **Dr. Lea Eisele**, Gruppenleiterin Batteriezelltechnologie

Mehr Informationen

Geschäftsfeld



Publikationen



Projekte



# Klimaneutrale Wärme und Gebäude

## Position im Markt

Die Umstellung auf erneuerbare Energieträger wird nicht nur aus Gründen des Klimaschutzes, sondern auch unter dem Aspekt der Versorgungs- und Kostensicherheit immer dringlicher. Im Gebäudesektor besteht die Herausforderung insbesondere darin, technische und systemische Lösungsansätze bereitzustellen, die eine große Bandbreite an Akteuren und Akteurinnen adressieren. Zu möglichen Lösungen zählen Technologien für die nichtfossile Wärmeerzeugung, Transformationskonzepte für Wohnungswirtschaft, Gewerbe, Industrie und Wärmeversorger sowie eine Optimierung der Prozesse durch Digitalisierung. Im Bauwesen kann eine gesteigerte Produktivität nur durch eine Standardisierung und Digitalisierung der Bauprozesse erreicht werden, wie wir sie unter anderem an standardisierten PV-Modulen für die Fassadenintegration entwickeln.

Damit ein beschleunigter Hochlauf der Wärmepumpen im Gebäudesektor mit natürlichen Kältemitteln gelingen kann, unterstützen wir technologisch die Entwicklung optimierter Kältemittelkreise und sichern Qualität durch Labor- und Feldtests. Auch entwickeln wir Kältekreisläufe und Quellenerschließungen, um eine vermehrte Nutzung von Groß- und Hochtemperatur-Wärmepumpen für Wärmenetze und industrielle Anwendungen zu ermöglichen. Darüber hinaus arbeiten wir an einer Integration der Geräte in die jeweilige Anwendung.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	221
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	29
 Vorträge und Konferenzbeiträge	37
 Patent-Erstanmeldungen	1

## Leitung

Sebastian Herkel, Telefon +49 761 4588-5117

## Themen in diesem Geschäftsfeld

### Gebäudesystemtechnik

Dr. Peter Engelmann, Telefon +49 761 4588-5129

### Betriebsführung von Gebäuden, Liegenschaften, Industrie

Nicolas Réhault, Telefon +49 761 4588-5352

### Gebäudehülle

Dr. Bruno Bueno, Telefon +49 761 4588-5377

### Wärmepumpen

Dr. Marek Miara, Telefon +49 761 4588-5529

### Wärme- und Kältespeicher

Dr. Sebastian Gamisch, Telefon +49 761 4588-5468

### Lüftung, Klima, Kälte

Dr. Lena Schnabel, Telefon +49 761 4588-5412

### Wasseraufbereitung und Stofftrennung

Dr. Joachim Koschikowski, Telefon +49 761 4588-5294

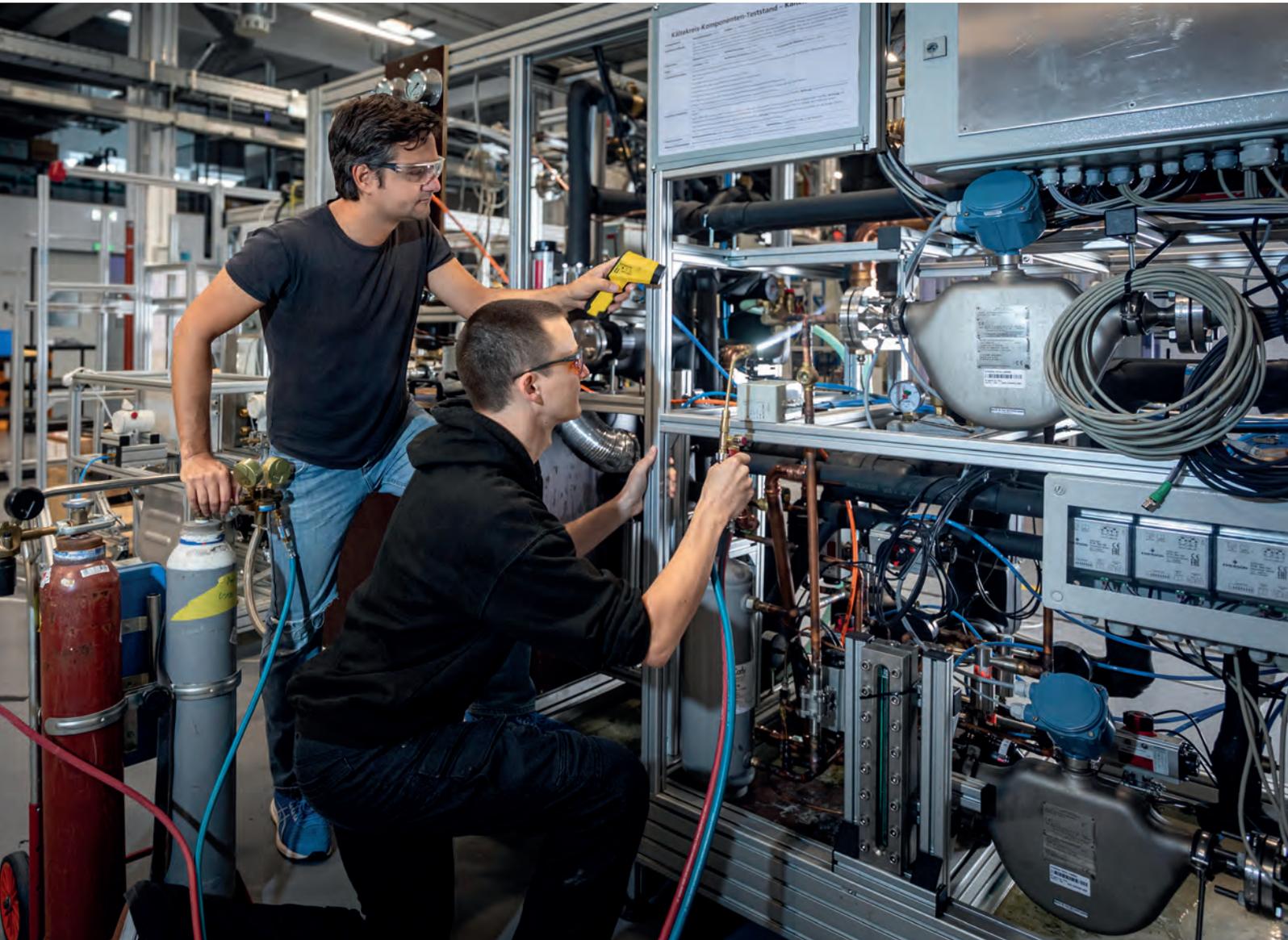
### Solarthermie: Anlagen und Komponenten

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





Durch Prototypenentwicklung und Prüfung sichern wir Qualität und Effizienz von Wärmepumpen mit natürlichen Kältemitteln.«



**Hannes Seifarth**,  
technischer Mitarbeiter,  
und **Philipp Bauer**,  
wissenschaftlicher  
Mitarbeiter

Mehr Informationen

Geschäftsfeld



Publikationen



Projekte



# Wasserstofftechnologien

## Position im Markt

Die Weltgemeinschaft will bis zum Jahr 2050 ihren CO<sub>2</sub>-Ausstoß stoppen – dieses Ziel rückt den Energieträger Wasserstoff in den Fokus, denn nachhaltig hergestellter Wasserstoff und seine Derivate können fossile Energieträger ersetzen. Die enorme Bandbreite der Anwendungsmöglichkeiten von Wasserstoff als Energieträger und -speicher sowie als Basischemikalie entfaltet jetzt ihr enormes Potenzial.

Für die notwendige Hochskalierung der Wasserstoffwirtschaft sind noch erhebliche Innovationen nötig, da sich die Technologie- und Marktentwicklung in zentralen Elementen der Wertschöpfungskette aktuell in einer frühen industriellen Phase befindet. Deshalb sind Forschungs- und Entwicklungsbeiträge – von grundlegenden Materialfragestellungen bis hin zu innovativen, skalierungsfähigen Produktionsverfahren – essenziell, um die Chancen für die deutsche Industrie auf allen Stufen der Wertschöpfungskette zu wahren.

Mit unserer Expertise begleiten wir Industriepartner und Auftraggeber bei der Entwicklung effizienter Technologien über die gesamte Wertschöpfungskette hinweg. Zusätzlich führen wir Lebenszyklus- und techno-ökonomische Analysen durch, mit denen wir Lösungen für die Produktion von Wasserstoff, seine effiziente Speicherung und bedarfsgerechte Verteilung entwickeln und bewerten können.

## Eckdaten

 Mitarbeitende	174
 Zeitschriften- und Buchbeiträge	13
 Vorträge und Konferenzbeiträge	21
 Patent-Erstanmeldungen	4

## Leitung

Ulf Groos, Telefon +49 761 4588-5202

## Themen in diesem Geschäftsfeld

### Brennstoffzelle

Ulf Groos, Telefon +49 761 4588-5202

### Elektrolyse und Wasserstoffinfrastruktur

Dr. Tom Smolinka, Telefon +49 761 4588-5212

### Nachhaltige Syntheseprodukte

Dr. Achim Schaadt, Telefon +49 761 4588-5428





Unser Ziel ist die großskalige Produktion von PEM-Elektrolyseuren. Hieran arbeiten wir mit nationalen und internationalen Akteuren.«



**Richard Lohmann**, Ingenieur  
im Projekt »HyFab«, und  
**Dr. Zohreh Kiaee**, Projektleiterin  
Produktion von Brennstoffzellen

Mehr Informationen

Geschäftsfeld



Publikationen



Projekte



# Systemintegration

## Position im Markt

Bei der angestrebten Transformation unserer Energieversorgung zu einem Net-Zero-Energiesystem spielt die Systemintegration eine zentrale Rolle. Viele Komponenten für die Bereitstellung emissionsfreier Energie sind heute zwar wettbewerbsfähig – ihre Integration in ein sektorenübergreifendes Gesamtenergiesystem bleibt jedoch eine große Herausforderung. Der Wärme-, Strom- und Mobilitätssektor werden zukünftig immer mehr ineinandergreifen müssen. Dies betrifft die Versorgung von Gebäuden und Quartieren ebenso wie den Netzausbau überregionaler Infrastrukturen zur Bereitstellung von Primärenergie.

Eine intelligente Systemintegration bezieht die aktuelle Situation mit ein: So stellt die Vielzahl kleiner PV-Anlagen hohe Anforderungen an die Versorgungssicherheit; zudem soll die Netzinfrastruktur bezahlbar bleiben. Hier können flexibel steuerbare Lasten und der Einsatz von Speichern, etwa durch rückspeisefähige E-Fahrzeuge, in einem digitalisierten Betriebsmanagement ineinandergreifen. Bei der Speicherung der erneuerbaren Energien mittels intelligenter Regelungskonzepte hat die Kopplung von Strom- und Wärmesektor ein hohes Nutzungspotenzial. Auch der Einsatz von Wasserstoff durch Elektrolyse für eine längerfristige Speicherung von Energie und deren Rückverstromung stellen wichtige Konzepte dar. Wir erforschen und entwickeln entsprechende Lösungen für die Energiewende konkret vor Ort und erproben sie gemeinsam mit Partnern in Reallaboren.

## Eckdaten

	Mitarbeitende	83
	Zeitschriften- und Buchbeiträge	15
	Vorträge und Konferenzbeiträge	53
	Patent-Erstanmeldungen	1

## Leitung

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

## Themen in diesem Geschäftsfeld

### Energiesystemanalysen

Dr. Christoph Kost, Telefon +49 761 4588-5750

### Integrierte Energieinfrastrukturen: Strom, Fernwärme, Gas

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

### Energiedatenanalyse

Nicolas Réhault, Telefon +49 761 4588-5352

### Flexibilitätsmanagement von Energieanlagen

Dr. Matthias Kühnbach, Telefon +49 761 4588-2373

### Klimaneutrale Industrie

Dr. Thomas Fluri, Telefon +49 761 4588-5994

### Klimaneutrale Städte, Quartiere, Vor-Ort-Systeme

Dr. Annette Steingrube, Telefon +49 761 4588-5062

### Elektromobilität

Dr. Robert Kohrs, Telefon +49 761 4588-5708

### Reallabore

Gerhard Stryi-Hipp, Telefon +49 761 4588-5686



**Wir forschen für eine Systemintegration, die alle Systemkomponenten innerhalb einer digitalisierten Netzinfrastruktur zusammenführt.«**



**Fabian Ernsting**, Bachelorand, und  
**Phillip Pütz**, wissenschaftliche Hilfskraft

Mehr Informationen

Geschäftsfeld



Publikationen



Projekte



# FuE-Infrastruktur

Das Fraunhofer ISE verfügt über eine hervorragende technische Infrastruktur. 22 300 m<sup>2</sup> Laborfläche – darunter 900 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 erschließen 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 48 ff](#)).

In unseren acht Laborzentren und vier produktionsnahen Technologie-Evaluationszentren entwickeln wir neue Produkte, Verfahren und Dienstleistungen und optimieren bestehende.

## Technologie-Evaluationszentren

SIM-TEC – Silicon Materials Technology Evaluation Center



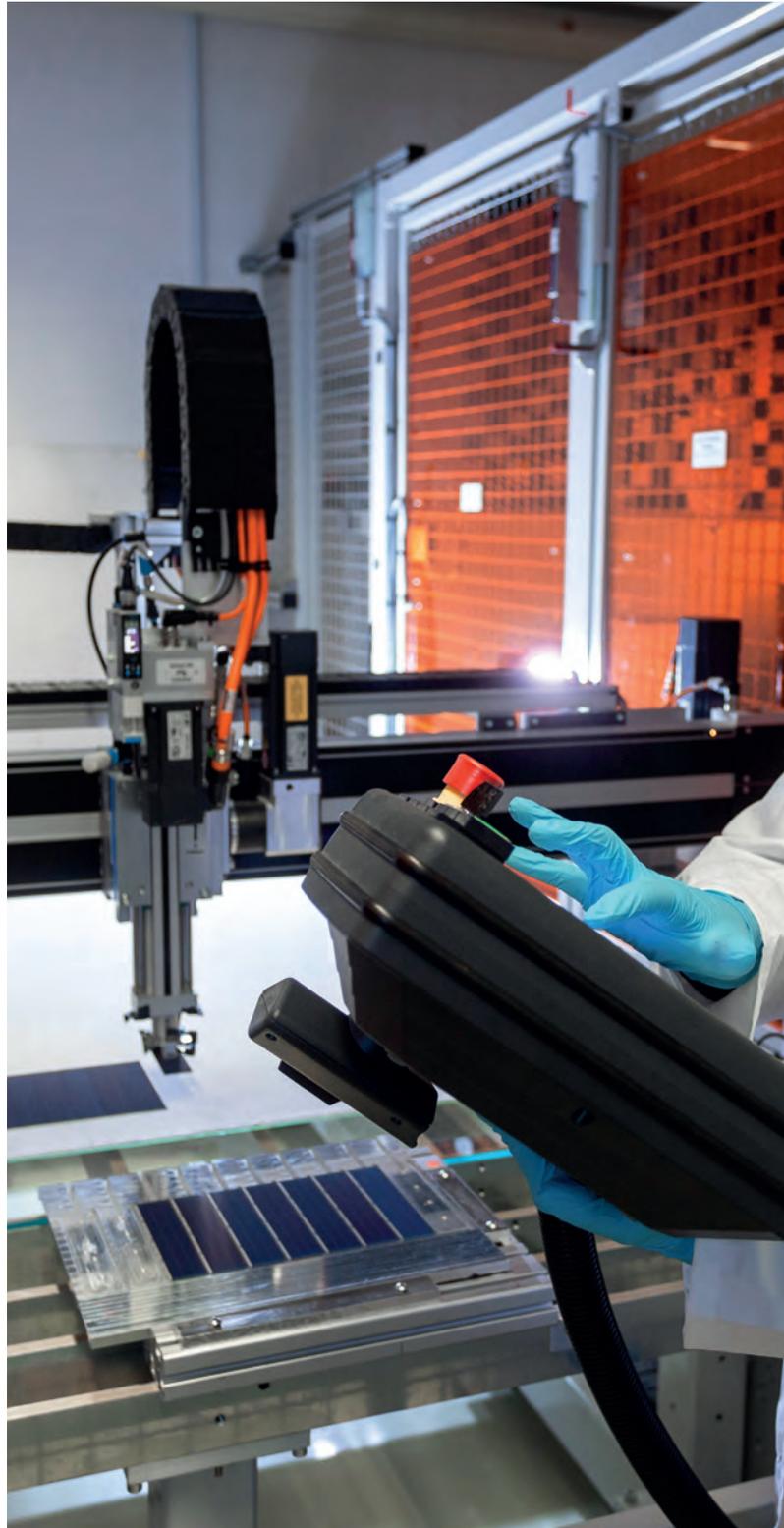
PV-TEC® – Photovoltaic Technology Evaluation Center



Module-TEC – Module Technology Evaluation Center



Con-TEC – Concentrator Technology Evaluation Center





## Laborzentren

Zentrum für höchsteffiziente Solarzellen



Zentrum für Organische und Perowskit-Photovoltaik



Zentrum für funktionale Oberflächen



Zentrum für Outdoor Performance



Zentrum für Leistungselektronik und nachhaltige Netze



Zentrum für elektrische Energiespeicher



Zentrum für Wärme- und Kältetechnologien



Zentrum für Elektrolyse, Brennstoffzellen und synthetische Kraftstoffe



*Qualitätskontrolle  
eines Schindelprozesses.*

# Akkreditierte Labors

---



## Kalibrierung von Solarzellen

Im [CaLab PV Cells](#) bieten wir die Kalibrierung von Solarzellen verschiedenster PV-Technologien an. Das Labor 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.

In den letzten Jahren haben wir unsere Messmöglichkeiten weiter ausgebaut und können somit auch aktuelle Silizium-solarzellen bis zu einer Kantenlänge von 22 cm hochgenau kalibrieren. Seit einigen Jahren arbeiten wir an Messmethoden für die Ermittlung realistischer Leistungsparameter Perowskit-basierter Solarzellen. Daher können wir Messungen für PSC-Si-Tandemsolarzellen bis zu einer Kantenlänge von 16 cm durchführen. Dabei bauen wir auf unsere langjährige Erfahrung speziell im Bereich III-V-Tandemsolarzellen auf. Hier stehen vor allem Weltraum-, Konzentrator-, und Laserleistungszellen im Fokus.

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

### Silizium-, Dünnschicht-, Perowskit-, organische Solarzellen

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

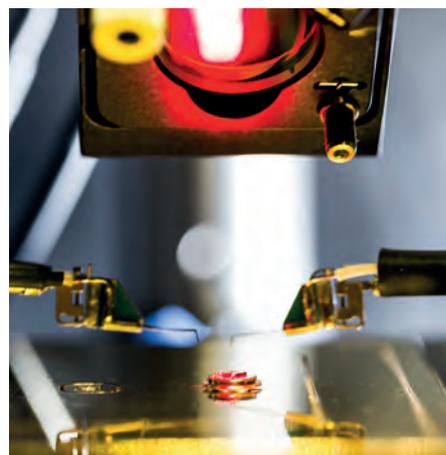
Wendy Schneider              Telefon +49 761 4588-5146

### Mehrfach- und Konzentratorzellen

Dr. Gerald Siefer              Telefon +49 761 4588-5433



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



*Charakterisierung einer Laserleistungszelle.*

**CalLab**  
PV Modules



## Kalibrierung von PV-Modulen

Das [CalLab PV Modules](#) ist das einzige akkreditierte Kalibrierlabor für Photovoltaik-Module in Deutschland. Hier führen wir schnell und zuverlässig präziseste Kalibrierungen für Produktionslinien durch. Im Unterschied zu einer klassischen Messdienstleistung zeichnet sich eine Kalibrierung z. B. durch höchste Ansprüche an Messunsicherheit und Rückführbarkeit aus. 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.

Die Erweiterung des Akkreditierungsumfangs für bifaziale sowie großformatige Module ergänzt das Produktportfolio und stellt eine wichtige Säule der Qualitätssicherung für zukunftsfähige Modul-Technologien dar. 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. Ein zentrales Element zur Verifizierung und Validierung der Messergebnisse ist das langjährig stabile Kalibrierniveau, das unseren Kunden und Projektpartnern Zuverlässigkeit und Sicherheit bietet.

Zudem entwickeln wir 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 am Sonnensimulator.

Martin Kaiser

Telefon +49 761 4588-5786



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



*Eingangsprüfung eines PV-Moduls.*

**TestLab**  
PV Modules



## Qualitätssicherung von PV-Modulen

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

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

Aktuell besteht eine sehr große Dynamik im Bereich neuer Zell- und Modulkonzepte. Module werden leistungsfähiger und größer und die Vielfalt der Zell- und Verschaltungskonzepte nimmt zu. Geteilte Zellen, Schindeltechnik mit und ohne Verbindersowie 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.

Daniel Philipp

Telefon +49 761 4588-5414



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



*Prüfung eines fahrzeug-integrierten PV-Moduls.*



## Charakterisierung von Fassaden und Bauteilen

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

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

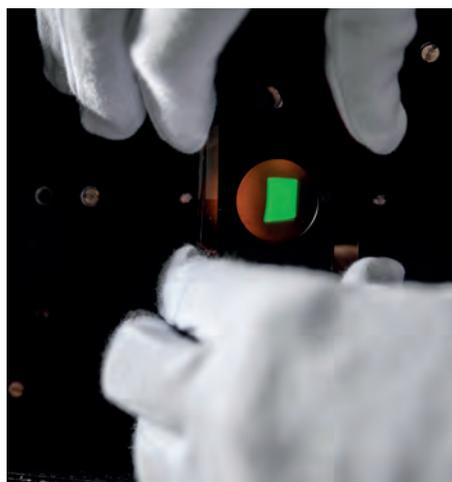
Wir verfügen über umfangreiche Erfahrung im Bereich der Sonnenschutzsysteme, der bauwerkintegrierten Photovoltaik (BIPV) und der bauwerkintegrierten Solarthermie (BIST). Für die Bewertung von Tageslichtnutzung und Blendung setzen wir in unseren Simulationsprogrammen goniometrisch ermittelte BSDF-Datensets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

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

Dr. Bruno Bueno                      Telefon +49 761 4588-5377



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



*Beleuchtete Probe an einer Apertur der Ulbrichtkugel.*



## 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.

Stefan Mehnert                      Telefon +49 761 4588-5741



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



*Solkollektor im Teststand.*

## 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 m<sup>3</sup>/h bis 5000 m<sup>3</sup>/h) im Temperaturbereich von -15 °C bis +50 °C bei relativer Luftfeuchtigkeit von 15 % bis 95 % konditioniert werden.

In unserem 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.

Ivan Malenković

Telefon +49 761 4588-5533  
Mobil +49 162 205 3924



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



Messung einer Wärmepumpe.

## TestLab Power Electronics



### Charakterisierung leistungselektronischer Geräte

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

Die Laborausstattung ermöglicht die Prüfung von Umrichter-Systemen 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.

Steffen Eyhorn

Telefon +49 761 4588-5957



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



1 MW Batterie-simulator im TestLab Power Electronics.

# Highlights unserer Forschung

---





**Mit unserer industrie-  
nahen Forschung und  
Entwicklung wollen wir  
helfen, die Energiewende  
zügig umzusetzen.«**

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

# Inhalt

---

	Hocheffiziente und skalierbare Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen . . . . .	56
	Fortschritte bei der Entwicklung von organischen Solarzellen mit hoher visueller Transmission . . . . .	57
	Entwicklung von höchsteffizienten Micro-CPV-Modulen . . . . .	58
	»III-V auf PorGe«: Entwicklung günstiger III-V-Mehrfachsolarzellen auf porosifiziertem Germanium . . . . .	59
	TOPCoRE-Solarzellen auf Gallium-dotierten Cz-Si-Wafern (p-Typ). . . . .	60
	Kontaktlose Inline-Kennlinien-Messung von Solarzellen mithilfe künstlicher Intelligenz . . . . .	61
	Den knappen Rohstoff Silber sparen: Kupferelektroden für nachhaltige TOPCon-Solarzellen. . . . .	62
	Kalibrierung und elektrische Charakterisierung von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen und -modulen . . . . .	63
	PV-Straßenüberdachungen – ein wichtiger Baustein für die Energiewende. . . . .	64
	Klimaresiliente, schwimmende PV-Kraftwerke . . . . .	65
	Probabilistische Vorhersagen der solaren Einstrahlung unter Nutzung von Satellitendaten . . . . .	66
	Digitalisierung von Forschungsdaten am Beispiel innovativer Batterietechnologien . . . . .	67
	Weltweit erster Mittelspannungs-Stringwechselrichter für zukünftige PV-Großkraftwerke . . . . .	68
	Electromagnetic-Transient-Modellierung (EMT) von Stromrichtern mittels standardisierter Schnittstellen . . . . .	69
	Auswirkungen dezentraler elektrischer Speichersysteme auf das Niederspannungsnetz . . . . .	70
	Neue Verfahren zur Gewinnung von Rohstoffen aus geothermalen Solen . . . . .	71

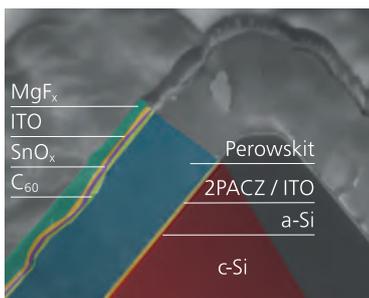


**Themen, die auf unsere Arbeit im Kontext Nachhaltigkeit besonderen Einfluss haben, sind mit diesem Symbol markiert.**

	Methode für eine vollständige digitale Repräsentation der Automation gebäudetechnischer Anlagen . . . . .	72
	Den Anwendungsbereich für thermisch angetriebene Adsorptionskälteanlagen erweitern . . . . .	73
	Wärmepumpen mit Propan für den Markt entwickeln . . . . .	74
	Effiziente Dekarbonisierung der Wärme- und Kältebereitstellung durch innovative thermische Speicher. . . . .	75
	Feldmessung zur Effizienz- und Schallbewertung von Wärmepumpen im Einfamilienhausbestand . . . . .	76
	Photovoltaisch-thermische Kollektoren – neue Produktlösungen für einen wachsenden Markt . . . . .	77
	Standardisierte BIPV-Fassadenelemente mit integrierter Leistungselektronik . . . . .	78
	Korrosionsschutzschichten für Bipolarplatten und »Porous Transport Layers« in der PEM-Elektrolyse . . . . .	79
	Eine nationale Wasserstoffstrategie für die Vereinigten Arabischen Emirate . . . . .	80
	Along-the-Channel-PEM-Elektrolysezelle zur ortsaufgelösten Untersuchung von Massentransporteffekten. . . . .	81
	Dimethylether als globaler Wasserstoffträger . . . . .	82
	Leistung und Lebensdauer von Brennstoffzellen unter Verwendung von kontaminiertem Wasserstoff. . . . .	83
	Transformationspfade zur Dekarbonisierung des Wärmesektors: ein Bottom-up-Ansatz . . . . .	84
	Gemeinschaftliche Gebäudeversorgung: die Wirtschaftlichkeit von Vor-Ort-Systemen im Vergleich . . . . .	85
	Dekarbonisierung der Energieversorgung von Liegenschaften . . . . .	86

## Hocheffiziente und skalierbare Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen

Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen haben sich zu einer vielversprechenden Nachfolgetechnologie der Siliziumsolarzelle entwickelt. Sie bauen auf der sehr ausgereiften Siliziumsolarzellentechnologie auf, indem eine Perowskitsolarzelle mit großer Bandlücke auf die Siliziumsolarzelle aufgebracht wird, sodass die Energie des Sonnenspektrums besser genutzt werden kann. Im Labormaßstab haben solche Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen bereits Wirkungsgrade über 33 % erzielt. Um solch effiziente Solarzellen herstellen zu können, müssen alle Schichten der Zelle genau aufeinander abgestimmt und die Grenzflächen zwischen ihnen optimiert werden. Dieser Aufgabe widmen wir uns gemeinsam mit fünf weiteren Fraunhofer-Instituten im Leitprojekt »MaNiTU«.



Querschnitt einer Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle unter dem Elektronenmikroskop.

Da nicht alle bisher im Labor verwendeten Herstellungsmethoden für die industrielle Fertigung geeignet sind, arbeiten wir am Fraunhofer ISE intensiv an der Entwicklung und Evaluation von Herstellungsmethoden, die die Massenfertigung erlauben. Im Projekt »PrEsto« steht das sogenannte Hybridverfahren im Fokus, bei dem der Perowskit-Absorber in einem zweistufigen Verfahren hergestellt wird. Wir konnten mit dieser Methode bereits Wirkungsgrade von 30 % erzielen. Der Vorteil dieses Ansatzes besteht darin, dass auch die in der Industrie üblichen texturierten Siliziumsolarzellen konformal beschichtet werden können und skalierbare Prozesstechnologien zur Verfügung stehen. Damit waren wir in der Lage, eine Tandemsolarzelle

im Format M2 herzustellen. Aufbauend auf dieser Erfahrung haben wir nun begonnen, in den Projekten »Pero-Si-SCALE« und »LiverPool« eine unabhängige Technologieplattform aufzubauen, um die Weiterentwicklung und Analyse von Zell- und Moduldesigns sowie deren Herstellungsprozesse für Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen zu ermöglichen.

Dank der enormen Vielfalt der Materialgruppe der Perowskite und der damit verbundenen Möglichkeit, die Absorptionseigenschaften in einem breiten Wellenlängenbereich einstellen zu können, ist es auch möglich, mehrere unterschiedliche Perowskitsolarzellen mit einer Siliziumsolarzelle zu verbinden und somit noch höhere Wirkungsgrade als nur mit zwei Materialien zu erreichen. Dreifachsolarzellen, die aus einer Siliziumteilzelle und zwei verschiedenen Perowskitteilzellen bestehen, erforschen wir im EU-Projekt »Triumph« und dem Projekt »RIESEN«. Die hohen Spannungen und geringen Ströme solcher Solarzellen reduzieren die Leistungsverluste bei der Metallisierung und Verschaltung der Zellen und verringern somit auch den Materialverbrauch von wertvollem Silber oder Kupfer. Für diesen Solarzellentyp erreichten wir nun am Fraunhofer ISE eine ausgesprochen hohe Leerlaufspannung von über 2,8 Volt. Dies ist ein wichtiger Schritt für die Entwicklung dieser neuen Dreifachsolarzellen.

**Die Projekte »Pero-Si-SCALE«, »LiverPool« und »RIESEN« werden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**

### Kontakt

Dr. Juliane Borchert  
Telefon +49 761 203-5475  
juliane.borchert@ise.fraunhofer.de

Perowskit-Silizium-Tandemsolarzelle im Format M2.





## Fortschritte bei der Entwicklung von organischen Solarzellen mit hoher visueller Transmission

Im Projekt »[Durchblick-PV](#)« entwickeln wir zusammen mit Partnern aus der Industrie und der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg organische Solarzellen mit hoher visueller Transmission. Dazu nutzen wir die einzigartigen optischen Eigenschaften bestimmter organischer Halbleiter, die im sichtbaren Spektralbereich lichtdurchlässig sind und dabei gleichzeitig eine hohe Absorption im Nahinfrarot-Bereich (NIR) aufweisen. Dies ermöglicht die Herstellung flächig homogener, semitransparenter Solarzellen. Um deren Wirkungsgrad zu erhöhen, ist der Einsatz von speziellen Elektrodensystemen erforderlich. Während die Frontelektrode im gesamten Spektralbereich möglichst transparent sein muss, soll die Rückelektrode eine hohe visuelle Transparenz mit einer hohen Reflexion im NIR verbinden. Dazu nutzen wir ein am Fraunhofer ISE entwickeltes Elektrodensystem auf der Basis dünner Silberschichten, das die gewünschten optischen Eigenschaften besitzt und gleichzeitig eine ausreichend hohe elektrische Leitfähigkeit aufweist. Konkret haben wir einen Schichtstapel aus AZO/Ag/AZO/Ag/AZO verwendet, wobei AZO für Al-dotiertes Zinkoxid steht. Die Deposition der einzelnen Schichten erfolgt durch Sputtern.

Das photoaktive organische Material wurde aus nichtchlorierten Lösemitteln aufgebracht, wie es auch in einer industriellen Produktion erforderlich wäre. Als obere Elektrode kommt ein transparentes, leitfähiges Polymer (PEDOT:PSS) zum Einsatz, das unser Kooperationspartner Heraeus herstellt. Durch den Einsatz einer neuen PEDOT:PSS-Formulierung und der Anpassung der Schichtdicke des Absorbers konnte eine hohe visuelle Transmission sichergestellt werden. Zudem ist es uns durch

Optimierung der rückseitigen Elektrode gelungen, die Anzahl an NIR-Photonen, die in die aktive Schicht zurück reflektiert werden, zu steigern. Dadurch erhöht sich die Stromproduktion der Solarzelle, ohne dabei die Transmission im Sichtbaren zu verringern.

Durch diese Entwicklungen konnten wir organische Solarzellen mit einem Wirkungsgrad von 8,7 % und einer gemittelten sichtbaren Transmission (AVT) von 46,3 % realisieren. Um semi-transparente Solarzellen mit verschiedenen Transmissionsgraden schnell und einfach vergleichen zu können, wird häufig die sogenannte light utilization efficiency, kurz LUE, verwendet. Sie ist das Produkt des Wirkungsgrades und der AVT. Unsere organischen Solarzellen erreichen eine LUE von 4,0 %. Dies ist ein vielversprechender Wert, da die Zellen ohne den Einsatz von Indium-Zinnoxid auskommen und aus nichtchlorierten Lösemitteln prozessiert werden. Aufgrund der vielfältigen Möglichkeiten der organischen synthetischen Chemie ist davon auszugehen, dass neue, verbesserte Halbleitermaterialien gefunden werden, die weitere Steigerungen im Wirkungsgrad ermöglichen. Damit lassen sich neue Einsatzgebiete für die organische Photovoltaik erschließen, insbesondere im Bereich der gebäudeintegrierten Photovoltaik und der Agri-Photovoltaik. Dank ihres geringen Gewichts, der leichten Integrierbarkeit und dem vorteilhaften Erscheinungsbild kann die organische PV perspektivisch einen wertvollen Beitrag dazu leisten, die Akzeptanz der [Integrierten Photovoltaik](#) in der Bevölkerung zu steigern.



*Organische Solarzelle mit hoher visueller Transmission.*

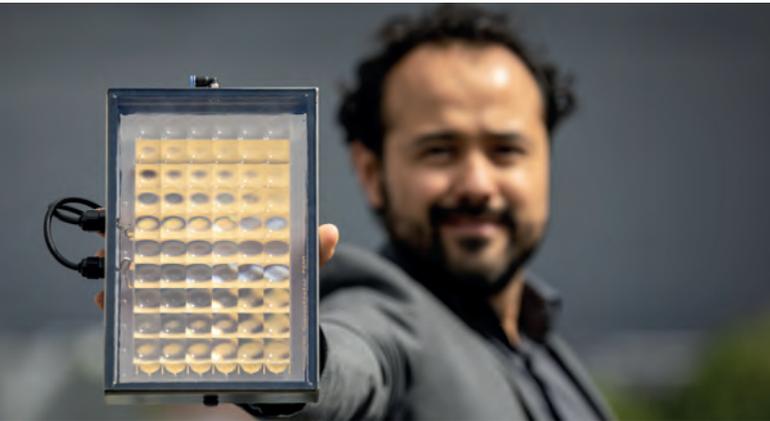
**Das Projekt »Durchblick-PV« wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**

### Kontakt

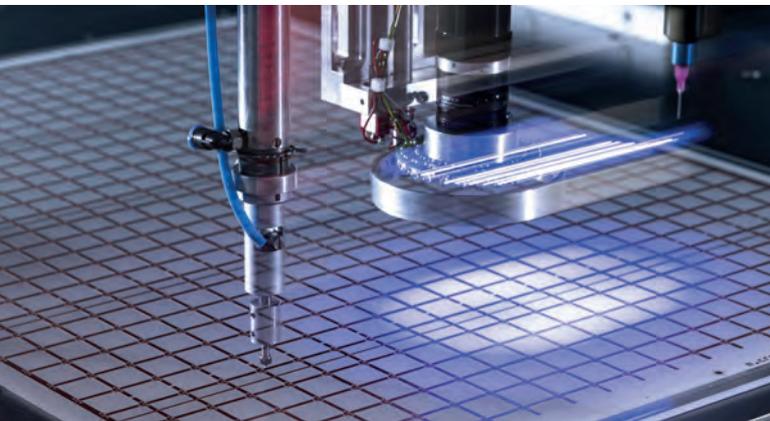
Dr. Uli Würfel  
Telefon +49 761 203-4796  
[uli.wuerfel@ise.fraunhofer.de](mailto:uli.wuerfel@ise.fraunhofer.de)



## Entwicklung von höchsteffizienten Micro-CPV-Modulen



*Am Fraunhofer ISE entwickeltes Micro-CPV-Modul mit einem Modulwirkungsgrad von 36,5 %, dem höchsten Wirkungsgrad für ein Modul mit industriellen Komponenten aus Europa.*



*Micro-CPV-Zellen werden auf die Leiterbahn der Modulbodenplatte gesetzt. Durch Selbstausrichtung des Solarzellen-Chips können die Solarzellen präzise positioniert werden.*

### Kontakt

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

**Das Projekt »micro-CPV« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**

Die konzentrierende Photovoltaik nutzt Linsen, um das direkte Sonnenlicht hundert- bis tausendfach zu konzentrieren und auf besonders hocheffiziente III-V-Mehrfachsolarzellen zu lenken. In unserer neuesten Modulentwicklung nutzen wir am Fraunhofer ISE besonders kleine Solarzellen mit einer Kantenlänge von 0,585 mm und nennen sie Micro-CPV. Aufgrund der kleinen Solarzellen- und Linsenflächen entsteht in jeder Zelle zwar nur eine geringe Leistung, dafür können wir aber dünne Kupfer-Leiterbahnen für die elektrische Verschaltung zwischen den Solarzellen sowie für die Wärmeableitung nutzen. Dies spart Material für zusätzliche Kühlelemente.

Für die Aufbau- und Verbindungstechnologie entwickeln wir am Fraunhofer ISE modernste Hochdurchsatzverfahren, die es möglich machen, viele Bauelemente gleichzeitig bzw. sehr schnell auf die Bodenplatten der Module zu setzen. Die winzigen Solarzellen müssen dabei exakt im Fokus der Linsen positioniert werden. Allerdings hilft uns die Oberflächenspannung des geschmolzenen Lots unter den Solarzellen, die Bauelemente auf die gedruckte Leiterbahn zu alignieren. Man spricht hier von »Selbstausrichtung«. Dieser Effekt erlaubt es, selbst bei einer Setzgenauigkeit der Solarzellen im Bereich von +/- 150 µm noch die geforderten Toleranzen im Modul zu erreichen.

Im Jahr 2022 konnten wir im Rahmen des Projekts [»micro-CPV«](#) erste Module der neuen Generation auf unserem Außenmessstand vermessen: Unter Konzentrator-Standardtestbedingungen (CSTC) erreichen wir hier einen exzellenten Wirkungsgrad von bis zu 36,5 %. Dabei haben wir III-V-Solarzellen der Firma AZUR Space in Heilbronn eingesetzt, die aus fünf übereinander gestapelten Teilzellen bestehen. Die III-V-Mehrfachsolarzellen wurden ursprünglich für Satelliten entwickelt und an die Bedingungen in Konzentratormodulen angepasst.

Die Micro-CPV-Module müssen dem Sonnenstand sehr genau nachgeführt werden – daher eignen sie sich besonders für den Sonnengürtel der Erde. Hier sehen wir auch gute Synergien mit der Herstellung von solarem Wasserstoff. Darüber hinaus lassen sich mithilfe der konzentrierenden Photovoltaik aufgrund der hohen Wirkungsgrade und kleinen Solarzellenflächen wertvolle Ressourcen und Energie in der Herstellung einsparen. Da die Zulieferindustrie vollständig in Europa angesiedelt ist, garantiert die konzentrierende Photovoltaik eine hohe Technologiesouveränität und Rohstoffunabhängigkeit. Im [Fraunhofer DeepTech Accelerator AHEAD](#) evaluieren wir gegenwärtig die Ausgründung einer neuen Firma zur kommerziellen Weiterentwicklung der Technologie.

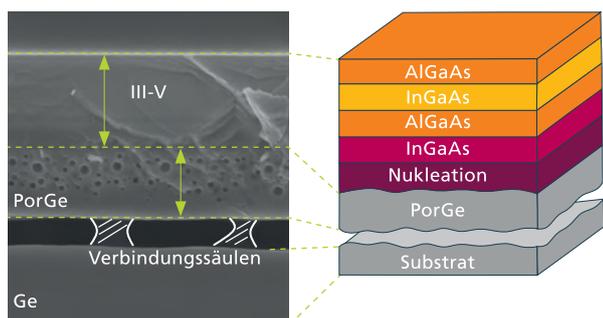


## »III-V auf PorGe«: Entwicklung günstiger III-V-Mehrfachsolarzellen auf porosifiziertem Germanium

III-V-Tandemsolarzellen zeigen im Vergleich zu Einfachsolarzellen höhere Wirkungsgrade bei der Umwandlung von Sonnenlicht in elektrischen Strom. Ihr wesentlicher Bestandteil sind verschiedene photoaktive Absorberschichten. Diese werden allerdings mit einem relativ langsamen Verfahren, der metallorganischen Gasphasenepitaxie (MOVPE), und teurem Galliumarsenid- (GaAs) oder Germaniumsubstrat hergestellt. Darüber hinaus ist die Solarzellenprozessierung komplex und kann nur mit geringem Durchsatz erfolgen. Das Substrat, das Schichtwachstum und die Prozessierung verursachen jeweils circa ein Drittel der Gesamtkosten. Jeder dieser Schritte auf dem Weg zur finalen Solarzelle muss daher kosteneffizienter gestaltet werden. Am Fraunhofer ISE haben wir Ansätze entwickelt, die zu Kostensenkungen führen können.

Das Germaniumsubstrat wird in einer Dicke verwendet, die für die finale Solarzelle nicht notwendig ist, für die mechanische Belastung bei der Prozessierung aber benötigt wird. Um den Verbrauch an Substratmaterial signifikant reduzieren zu können, bedienen wir uns der elektrochemischen Porosifikation mit anschließendem Hochtemperaturprozess. Bei der Porosifikation wird gezielt Material abgetragen, sodass ein Porositätsgradient entsteht. Durch den Heizprozess entsteht eine Sollbruchstelle im Substrat. Die finale Substratdicke wird auf ca. 0,8–0,9 µm reduziert. Das Wachstum der III-V-Zellen findet danach auf dem modifizierten Substrat statt. Nach der Solarzellenprozessierung wird an der eingebauten Sollbruchstelle abgelöst (siehe Abbildung). Das initiale Substrat steht dem Kreisprozess erneut zur Verfügung.

*REM-Bild (links) des schematischen Schichtstapels (Mitte) nach Porosifikation, Annealing und III-V-Epitaxie. Foto einer hocheffizienten III-V/Si-Tandemsolarzelle mit Mask-and-Plate-Vorderseitenmetallisierung (rechts).*

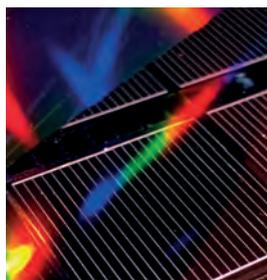


Die relativ hohen Kosten der III-V-Epitaxie entstehen vor allem durch die langen Prozesszeiten. Typische Wachstumsraten, zum Beispiel für GaAs, liegen unter 10 µm/h, bei Absorberdicken bei bis zu 3 µm/h. Wir konnten zeigen, dass durch geschickte Prozessoptimierungen Wachstumsraten >280 µm/h mit MOVPE möglich sind. Zusätzlich zeigt sich, dass dann 5-fach kleinere V/III-Verhältnisse (Verhältnis von Präkursoren der Gruppe III zu Gruppe V) von Vorteil sind, sowie die Einbaueffizienz der Präkursoren der Gruppe III um 60 % erhöht werden kann. Bei einer Wachstumsrate von 100 µm/h wurden bereits erste GaAs-Einfachsolarzellen mit einem Wirkungsgrad von 23,6 % demonstriert. In den Projekten »H2DEMO« und »Vorfahrt« entwickeln wir diesen Ansatz weiter und übertragen ihn auf Tandemzellen.

Auch die Kosten für Metallisierung (Zellprozessierung) können durch den Mask-and-Plate-Ansatz deutlich gesenkt werden, wie wir im Projekt »SALLI« zeigen konnten. Hier wird die Maske materialsparend mit Inkjetdruck aufgebracht und das Metall durch Plating in schmalen Öffnungen abgeschieden. Fingerbreiten von lediglich 10 µm konnten auf diese Weise bereits demonstriert werden und erste Solarzellen erreichten Wirkungsgrade von mehr als 30 %.

All diese Entwicklungen, die wir am Fraunhofer ISE zur Wiederverwendung der Germaniumsubstrate, der Erhöhung des Durchsatzes beim Aufwachsen der III-V-Schichten und beim Metallisieren der Solarzellen erforscht haben, führen zu einer signifikanten Kostenreduktion von III-V-Tandemsolarzellen.

**Das Projekt »H2DEMO« wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert. Das Projekt »SALLI« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**



### Kontakt

Dr. Waldemar Schreiber  
 Telefon +49 761 4588-5641  
 waldemar.schreiber@ise.fraunhofer.de

# TOPCoRE-Solarzellen auf Gallium-dotierten Cz-Si-Wafern (p-Typ)

In der industriellen Solarzellenherstellung ist derzeit ein klarer Trend von PERC-Solarzellen auf p-Typ-Wafern hin zu Solarzellen mit ladungsträgerselektiven Kontakten auf Wafern des n-Typs zu erkennen. Davon machen TOPCon-Solarzellen derzeit den größten Teil aus – eine Technologie, die am Fraunhofer ISE entwickelt wurde. Dass sich die Industrie derzeit für n-Typ Cz-Si entschieden hat, geht einher mit aktuell höheren Waferkosten im Vergleich zu p-Typ Cz-Si-Wafern.

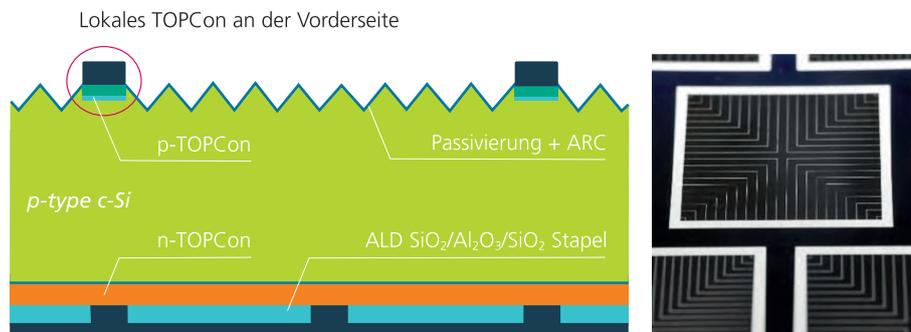
Am Fraunhofer ISE konnten wir im Labor mit Rekordwirkungsgraden für TOPCoRE-Solarzellen auf p-Typ FZ-Si-Wafern und mit Simulationen frühzeitig zeigen, dass diese ein höheres Wirkungsgradpotenzial besitzen als TOPCon-Solarzellen des n-Typs. Bei der Solarzellenherstellung auf p-Typ-Wafern trat ein Phänomen auf, das wir lichtinduzierte Verbesserung (LIV) benannt und näher untersucht haben. Bei LIV verbessern sich Solarzellenparameter bei Beleuchtung innerhalb von Sekunden, was die Klassifizierung von Solarzellen für den Modulbau vor Herausforderungen stellt. Um einen möglichen Transfer der Technologie in die Industrie zu erleichtern, galt es, möglichst die Ursache der raschen Verbesserung zu identifizieren. Zu diesem Zweck haben wir Teststrukturen angefertigt, die die unterschiedlichen Bereiche der TOPCoRE-Solarzelle repräsentieren: A) Rückseite (Tunneloxid + poly-Si(n<sup>++</sup>) + SiNx:H), B) Vorderseite der TOPCoRE-Solarzelle, C) TOPCoRE-Solarzellen, D) i-Voc-Testarchitekturen. Die Testarchitektur, die die Rückseite repräsentiert (A), zeigt keine rasche Verbesserung unter

Beleuchtung, obwohl außerordentlich gute Ladungsträger-Lebensdauern und implizierte offene Klemmspannungen gemessen wurden. Das legt nahe, dass weder die Rückseitenpassivierung noch die Gallium-dotierten p-Typ-Wafer die Ursache für die rasche lichtinduzierte Verbesserung sind. Alle anderen Architekturen B, C und D zeigten jedoch LIV.

LIV ist bereits vor der Metallisierung oder dem Feuerprozess für Metallkontakte zu beobachten. Auf den symmetrischen Testarchitekturen, die die TOPCoRE-Vorderseite repräsentieren, konnten wir zudem zeigen, dass unabhängig davon, ob Hochtemperaturprozesse wie Bor-Diffusion und poly-Si-Anneal angewandt werden oder nicht, LIV auftritt. Aus der Literatur ist bekannt, dass AlO<sub>x</sub>, das zur Passivierung der Vorderseiten eingesetzt wird, zu LIV führen kann – allerdings werden in der Fachliteratur dafür Zeiteinheiten genannt, die um ein Vielfaches länger sind. Auch ist bekannt, dass beispielsweise Fe-Ga- oder Fe-B-Paare unter Beleuchtung ihre Bindung verlieren und interstitielles Fe<sub>i</sub> entsteht.

Da TOPCoRE-Solarzellen auf p-Typ-Silizium dazu beitragen können, die Produktionskosten für Solarenergie zu senken, werden wir am Fraunhofer ISE mit weiteren Forschungen dazu beitragen, die Ursache für LIV zu ermitteln. Wir wollen damit Wege aufzeigen, damit diese Solarzellenstruktur von der PV-Industrie aufgegriffen wird.

Struktur und erste Zellergebnisse von TOPCoRE-Laborprototyp-Solarzellen mit lokaler p-TOPCon-Frontkontaktpassivierung.



## Kontakt

Dr. Jochen Rentsch  
 Telefon +49 761 4588-5199  
 jochen.rentsch@ise.fraunhofer.de

Frontkontaktpassivierung	$J_{sc}$ [mA/cm <sup>2</sup> ]	$V_{oc}$ [mV]	FF [%]	$\eta$ [%]
Lokales TOPCon	41,7	728	81,1	24,6

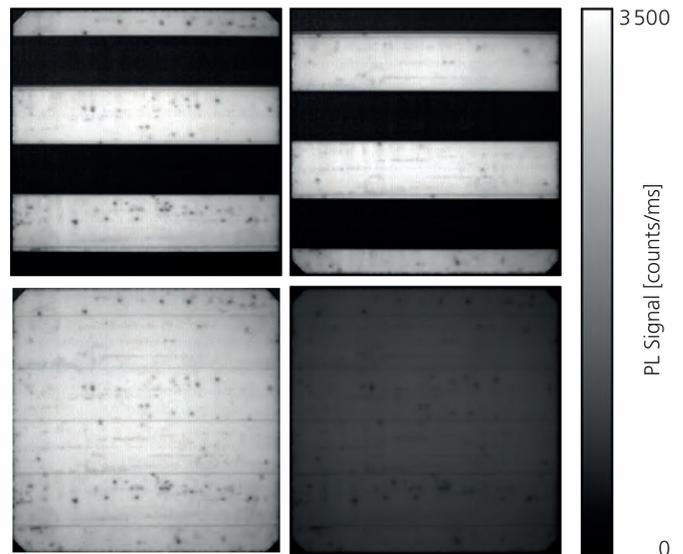
Interne Messung, 4 cm<sup>2</sup> designated area, ohne MgF<sub>2</sub> doppellagige Antireflexschicht (ARC)

# Kontaktlose Inline-Kennlinien-Messung von Solarzellen mithilfe künstlicher Intelligenz

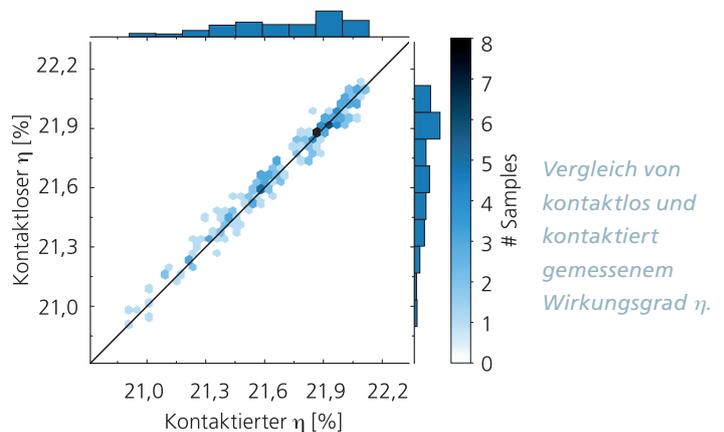
Eine Möglichkeit, die Herstellungskosten von Solarzellen zu senken, liegt in der Steigerung des Durchsatzes aller Produktionsanlagen. Im Projekt »NextTec« haben wir am Fraunhofer ISE daher den Produktionsprozess auf Beschleunigungspotenziale untersucht. Die Messung der Strom-Spannungs-Kennlinie (IV) am Ende der Produktionslinie ist unverzichtbar, limitiert den Durchsatz aber erheblich, da die Zellen für die Messung kontaktiert werden müssen, was mehr Zeit in Anspruch nimmt als der eigentlich Messvorgang. Im letzten Jahresbericht 2022/23 des Fraunhofer ISE haben wir bereits ein physikalisches Modell zur kontaktlosen IV-Messung von Solarzellen vorgestellt.

Ein alternativer kontaktloser Ansatz, der auf künstlicher Intelligenz basiert und die Bildauswertung erweitert, benötigt weniger und vor allem nur schnelle inline-fähige Messtechnik, so dass ein Durchsatz von bis zu 20 000 Zellen/Stunde möglich ist – und damit eine Durchsatzsteigerung etwa um den Faktor 4. Unser Verfahren basiert auf einer Serie von Photolumineszenz-Messungen bei variiertem Beleuchtungsintensität und Abschattung (Abbildung) und einer spektralen Reflexionsmessung. Jede Messung weist auf andere Qualitätseigenschaften der Zelle hin, wobei relevante Kenngrößen aus Einzelmessungen nicht ohne weiteres ableitbar sind. Deshalb wurde ein falten- des neuronales Netz entwickelt, um sämtliche orts- sowie spektralaufgelösten Daten aus den kontaktlosen Messungen zu kombinieren und anhand der auftretenden Muster in den hochdimensionalen Daten die relevanten Qualitätsgrößen der Solarzelle, wie Wirkungsgrad, Leerlaufspannung oder auch die gesamte IV-Kennlinie der Zelle, zu ermitteln. In einer umfangreichen Studie wurde ein Datensatz mit 4500 Proben zum Training und zur Evaluation der Modelle erhoben. Die Auswertung der Modelle zeigt, dass eine sehr gute Übereinstimmung der kontaktlosen KI-Vorhersage mit den Ergebnissen kontaktierender Messgeräte besteht (Grafik). Wir haben weiterhin gezeigt, dass die Sortierung mittels kontaktloser Messungen die gleiche Modulqualität erzielt wie mit kontaktierenden Messungen.

Die kontaktlose IV-Messung hat gegenüber der kontaktierten Messung zahlreiche Vorteile im Hinblick auf Durchsatz, Wartungskosten und Ausfallzeiten. Durch den Wegfall des Kontaktierungsschritts kann die Messzeit reduziert werden. Zudem entfällt der mechanische Druck, den die Kontaktelektroden auf die Zelle ausüben, sodass die Bruchrate und damit die Stillstandzeiten der Anlage reduziert werden können. Durch den Verzicht auf die Kontaktelektroden entfallen zudem Kosten durch Verschleiß und Wartung.



Teilabgeschattete (erste Zeile) sowie homogen beleuchtete (zweite Zeile) Photolumineszenz-Messungen einer Beispielzelle.



Vergleich von kontaktlos und kontaktiert gemessenem Wirkungsgrad  $\eta$ .

**Das Projekt »NextTec« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**

## Kontakt

Dr. Stefan Rein  
Telefon +49 761 4588-5271  
stefan.rein@ise.fraunhofer.de



## Den knappen Rohstoff Silber sparen: Kupferelektroden für nachhaltige TOPCon-Solarzellen



*TOPCon-Solarzelle metallisiert mit reiner Kupferpaste (Testlayout).*

Der steigende Anteil von Photovoltaik im weltweiten Energiemix erfordert verbesserte Wirkungsgrade sowie nachhaltige Produktionsverfahren. Um wertvolle Ressourcen zu schonen, haben wir am Fraunhofer ISE wegweisende Ansätze für nachhaltigere Metallisierungsprozesse für Solarzellen untersucht. Hocheffiziente Solarzellenkonzepte, wie die am Fraunhofer ISE entwickelte TOPCon-Technologie, gewinnen aktuell Marktanteile. Sie haben allerdings noch den Nachteil, dass sie deutlich mehr Silber als bisherige Konzepte benötigen. Daher kann eine Silberknappheit künftig zu deutlichen Preisanstiegen führen und sogar die globalen Produktionsmengen gefährden.

Bisher wurde vor allem daran gearbeitet, mit dem etablierten Siebdruckverfahren immer schmalere »Finger« herzustellen, so dass die verwendete Silbermenge reduziert werden kann (Feinliniensiebdruck). In diesem FuE-Bereich haben wir am

Fraunhofer ISE immer wieder neue Rekordwerte erzielt, die sich anschließend in der industriellen Fertigung widerspiegeln. Eine Alternative zu Silber ist Kupfer – es ist deutlich günstiger und hat eine vergleichbare Leitfähigkeit. Ersetzt man Silber in den Druckpasten teilweise durch Kupfer, kann man größtenteils auf bisherige Produktionstechnologie zurückgreifen. Weil Kupfer sehr schnell oxidiert und dadurch schwieriger zu verarbeiten ist, haben wir anfangs vor allem auf Silber-ummantelte Kupferpartikel zurückgegriffen. Mittlerweile lassen sich gute Ergebnisse auch mit Silber/Kupfer-Mischungen (blends) oder reinen Kupferpasten erzielen. In ersten Versuchen haben wir am Fraunhofer ISE eine gedruckte Kupfermetallisierung zunächst für die Rückseite von TOPCon-Solarzellen getestet. Damit konnten wir nachweisen, dass sich die gleiche Leistung erzielen lässt, solange eine Kleinmenge siebgedrucktes Silber für die Kontaktschicht eingesetzt wird. Dieser Ansatz spart bis zu 45 % Silber pro Zelle und kann kurzfristig in die industrielle Fertigung übernommen werden.

Galvanische Metallabscheidung ist ein alternativer Ansatz, bei dem fast vollständig auf Silber verzichtet wird. Durch Laserablation und galvanische Abscheidung von Nickel, Kupfer und Silber wird ein Metallkontakt gebildet. Testweise haben wir galvanisch abgeschiedene Nickel-Kupfer-Silber-Kontakte auf industriellen TOPCon-Solarzellen erprobt und damit eine Silberreduktion von über 90 % und Wirkungsgrade von mehr als 24 % demonstriert. Die Zellen wurden bereits erfolgreich mittels Lötverschaltung in 60-Zell-Module weiterverarbeitet. Basierend auf diesen Erfolgen haben wir im Projekt »Indianapolis« eine Hochdurchsatz-Pilotanlage zur galvanischen Metallisierung am Fraunhofer ISE in Betrieb genommen. Das Ziel ist nun, diese Ergebnisse in enger Kooperation mit Industriepartnern weiterzuentwickeln, damit sich die nachhaltige TOPCon-Metallisierung mit Kupferelektroden durchsetzen kann.

### Kontakt

Dr.-Ing. Sven Kluska  
Telefon +49 761 4588-5382  
sven.kluska@ise.fraunhofer.de

*Am Fraunhofer ISE konnte 2023 eine neue Prototypen-Anlage für die Forschung an galvanischer Nickel-Kupfer-Silber-Metallisierung in Betrieb genommen werden.*



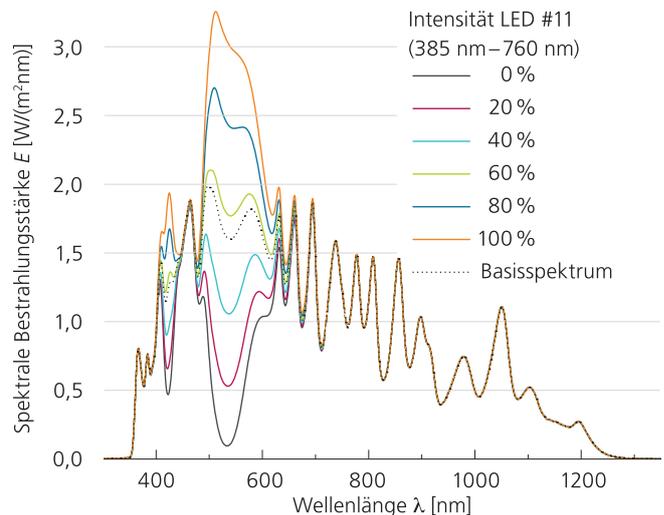
## Kalibrierung und elektrische Charakterisierung von Perowskit-Silizium-Tandemsolarzellen und -modulen

Um hocheffizienten Perowskit-Silizium-PV-Modulen den Weg in die industrielle Fertigung zu ebnet, müssen die Tandemsolarzellen und -module zuverlässig vermessen werden. Nur so sind objektive Vergleiche zwischen verschiedenen Zellen und Modulen sowie ein gutes physikalisches Verständnis für technologische Verbesserungen möglich. Im Unterschied zu klassischen Silizium-PV-Modulen ist die Kalibrierung hier jedoch schwieriger.

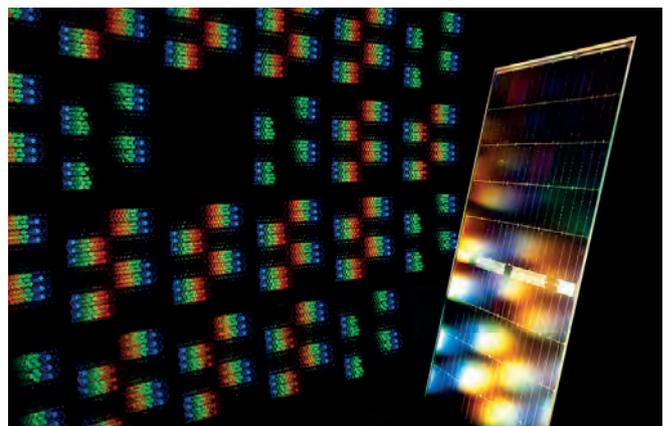
Am Fraunhofer ISE begegnen wir dieser Herausforderung, indem wir 2023 einen weltweit einmaligen, LED-basierten Sonnensimulator im [CalLab PV Modules](#) in Betrieb genommen haben. Im Unterschied zu herkömmlichen, Xenonlampen-basierten Simulatoren, ermöglicht dieser eine präzise Einstellung der spektralen Eigenschaften der Lichtquelle in einem Bereich von 340 bis 1650 Nanometern, indem 26 unterschiedliche Farbkanäle separat angesteuert werden können. Module bis zu einer Fläche von 240 x 130 cm<sup>2</sup> können getestet werden. Die Herausforderung besteht nun darin, diesen Sonnensimulator für die präzise Vermessung verschiedener Tandembasierter Module zu qualifizieren und angepasste Prüfroutinen zu entwickeln.

Bei Mehrfach-Solarzellen, bei denen Zellen mit unterschiedlichen spektralen Eigenschaften übereinander angeordnet sind, muss das Messspektrum so eingestellt werden, dass jede Zelle exakt den Strom liefert, den sie unter dem standardisierten AM1.5-Sonnenspektrum liefern würde. Die Ansteuerung und Umsetzung ist dabei nicht trivial, da sich die Farbkanäle gegenseitig etwa aufgrund von thermischen Wechselwirkungen stark beeinflussen und verschiedene Nichtlinearitäten sowie zeitliche Abweichungen während der Messung auftreten.

Am Fraunhofer ISE haben wir diese Wechselwirkungen umfangreich untersucht und beschrieben. Damit haben wir die Grundlage zur Definition von individuell an das jeweilige Messobjekt angepassten Ansteuerprofilen für das LED-Array geschaffen. Das so entwickelte Verfahren zur spektralen Anpassung von LED-basierten Sonnensimulatoren konnten wir durch einen Messvergleich mit einem etablierten 3-Quellen-Solarsimulator für die Zellkalibrierung verifizieren. Außerdem konnte eine sehr gute Übereinstimmung zwischen theoretisch errechneten und tatsächlich gemessenen Simulator-Spektren erzielt werden, wodurch Messunsicherheiten in der Tandem-Kalibrierung reduziert werden. Dies ist ein wichtiger Meilenstein zur Etablierung von präzisen und rückführbaren Leistungsmessungen für Perowskit-Silizium-Tandemmodule.



*Messung der spektralen Bestrahlungsstärke des Farbkanals #11 (385–760 nm) mit unterschiedlicher Intensität. Um die spektralen Eigenschaften der verschiedenen LEDs unter realen Betriebsbedingungen zu charakterisieren, werden diese nicht wie üblich getrennt voneinander charakterisiert, sondern innerhalb eines aus allen LEDs zusammengesetzten Basisspektrums.*



*Der neue Sonnensimulator ist ein Meilenstein hin zu einem standardisierten Kalibrierverfahren für Perowskit-Silizium-Tandemmodule.*

### Kontakt

Alexandra Schmid  
Telefon +49 761 4588-5066  
alexandra.schmid@ise.fraunhofer.de



## PV-Straßenüberdachungen – ein wichtiger Baustein für die Energiewende



*Demonstrationsanlage einer PV-Straßenüberdachung an der Rastanlage Hegau-Ost, Baden-Württemberg.*

Photovoltaikanlagen über Autobahnen können mit ihrer solaren Stromerzeugung einen sinnvollen Beitrag in Richtung Klimaneutralität leisten. Im Rahmen des Projekts [»PV-Süd«](#) haben wir am Fraunhofer ISE gemeinsam mit dem AIT Austrian Institute of Technology und der Forster Industrietechnik GmbH eine Demonstrationsanlage zur PV-Straßenüberdachung entwickelt, geplant und umgesetzt.

Die Pilotinstallation befindet sich an der Durchfahrgasse der Rastanlage Hegau-Ost an der A81. Das Projektkonsortium hatte vorab in Laborversuchen und mit Simulationen die Eignung und Anforderungen an die PV-Module und die Unterkonstruktion der Straßenüberdachung entwickelt und geprüft. Dabei wurden die hohen Anforderungen im Verkehrssektor berücksichtigt, z. B. der Anprall- und Brandschutz. Die 12 mal 14 m große Dachfläche aus Photovoltaik-Modulen, die sich etwa 5,50 m über der Fahrbahn befindet, ruht auf einer Stahlkonstruktion. Die PV-Module sind in einer Pultdachform angeordnet, um neben Wasserabführung einen hohen Stromertrag zu gewährleisten. Da die Glas-Glas-PV-Module für

Überkopfverglasung zugelassen sind, konnten diese ohne eine zusätzliche Sicherung in die Konstruktion eingebunden werden und ermöglichen zwischen den Solarzellen einen Lichtdurchlass auf die Fahrbahn. Insgesamt sind 96 PV-Module mit einer Gesamtkapazität von 30 Kilowatt-Peak (kWp) installiert.

Im Rahmen des Projekts »PV-Süd« werden wir die Erträge, die Wirtschaftlichkeit und potenziellen Vorteile einer Straßenüberdachung untersuchen. Mit den angesetzten Kosten und Skalierungseffekten des PV-Generators sind spezifische Anlagenkosten von unter 5000 €/kWp möglich. Dabei spielt die Unterkonstruktion eine entscheidende Rolle, da diese im Sinne der industriellen Produktion weniger skalierbar ist. Durch die potenzielle Netzeinspeisung des Demonstrators von ca. 30 000 kWh/Jahr, die in der Konzeptbetrachtung berechnet wurde, kann die Wirtschaftlichkeit abhängig von Einspeisetarif ermittelt werden. Durch die hohen Kosten der Unterkonstruktion sind PV-Straßenüberdachungen aus wirtschaftlicher Sicht nicht mit klassischen Freiflächenanlagen vergleichbar. Allerdings nutzen sie bereits versiegelte Flächen unserer Verkehrsinfrastruktur und können sich auch bei PV-Ausstattung über mehrere Generationen über den gesamten Standzeitraum der Unterkonstruktion rechnen, was sich positiv auf ihren »ökologischen Fußabdruck« auswirkt. Dies fällt besonders bei nieder-rangigem Straßenverkehr ins Gewicht, z. B. innerorts oder über Fahrradwegen, da dort die Unterkonstruktion auch reduzierter ausgelegt werden kann als bei Autobahnen.

PV-Straßenüberdachungen für den hochrangigen Verkehr (insbesondere Autobahnen) bieten sich grundsätzlich dort an, wo der Strom direkt genutzt werden kann, z. B. in der Nähe von Tunneln oder Rastanlagen, da das Lastprofil des Tunnels sich sehr gut mit dem Erzeugungsprofil der PV-Module deckt. Auch hilft die Teildurchsichtigkeit der Anlagen dabei, dass sich die Augen der Verkehrsteilnehmerinnen und -teilnehmer an die Tunnelabschattung gewöhnen können.

### Kontakt

Jacob Forster  
Telefon +49 761 4588-2282  
jacob.forster@ise.fraunhofer.de

*Detailbild der transparenten Module des Demonstrators an der Rastanlage Hegau-Ost, Baden-Württemberg.*





## Klimaresiliente, schwimmende PV-Kraftwerke

Floating-PV (FPV) stellt in Europa eine vergleichsweise neue Technologie dar – mit beachtlichem Potenzial auf globaler Ebene. Floating-PV-Kraftwerke bestehen aus PV-Modulen, die auf schwimmenden Unterkonstruktionen auf dem Wasser platziert werden. Es ist davon auszugehen, dass FPV-Anlagen die Hydrologie und das Ökosystem der Gewässer beeinflussen; die konkreten Auswirkungen von Floating-PV sind aber noch unzureichend erforscht. Insbesondere der Einfluss von FPV auf die Klimaresilienz des Gewässers ist noch unklar. Infolge des Klimawandels ist diese Resilienz gefährdet: So werden sich die thermischen Eigenschaften von Seen auf absehbare Zeit verändern, was sich negativ auf ihre Durchmischung und ökologische Güte auswirken kann. Auch ist zu erwarten, dass die klimatischen Veränderungen die Funktion der Seen als Kohlenstoffsänke beeinträchtigen werden. Am Fraunhofer ISE haben wir daher in verschiedenen Studien die Auswirkungen von FPV auf Thermik, Wasserqualität und Verdunstung untersucht.

Der Maiwaldsee ist einer von zahlreichen Baggerseen im Oberrheingraben. In einer [Feldstudie](#) wurde ein Monitoring an der dortigen FPV-Anlage durchgeführt, um Veränderungen der thermischen Eigenschaften des Sees zu dokumentieren. Auswirkungen konnten insbesondere in den oberen Wasserschichten – bis zu einer Tiefe von fünf Metern – beobachtet werden. So war der mit Floating-PV ausgestattete See in heißen Perioden unter der Anlage tagsüber um bis zu 2,8 Kelvin kühler, während er nachts aufgrund verminderter Wärmeemission um bis zu 1,4 Kelvin wärmer war. Bei der Modellierung verschiedener Seebedeckungsgrade zeigte sich, dass größere Anlagen zu einer instabileren thermischen Schichtung und kürzeren Schichtungsdauer im See führen würden. Diese Anlagen würden somit den erwarteten Folgen des Klimawandels entgegenwirken.

Das Projekt [»FPV4Resilience«](#) untersucht, inwiefern FPV die Klimaresilienz von Seen steigern kann. Hierfür wurde ein umfangreiches Monitoring an verschiedenen europäischen FPV-Standorten eingerichtet, die sich bezüglich ihres FPV-Systemdesigns und des vorhandenen Seetyps unterscheiden. Dabei wurden ausschließlich präferenzielle Standorte zur Installation von Floating-PV, wie beispielsweise Kiesseen, Sandgruben oder Stauseen, berücksichtigt. Ziel des Projekts ist, aus der Wechselwirkung von Floating-PV mit dem See sowie anhand hydrologischer und meteorologischer Kenngrößen eine Definition der Klimaresilienz von Seen abzuleiten. Über Simulationen sollen schließlich die Pareto-Optima von Stromertrag und Klimaresilienz bestimmt und mit den vorhandenen Messdaten abgeglichen werden.

Der Nassersee ist einer der größten Stauseen der Welt und befindet sich zu Teilen in Ägypten und dem Sudan. In ariden Gebieten mit großen Wasserreservoirs ist von einem großen Potenzial zur Verdunstungsminderung durch Floating-PV auszugehen. Wir haben daher ein Modellierungsexperiment durchgeführt, in dem unterschiedliche FPV-Anlagengrößen auf dem Reservoir simuliert und die damit verbundenen Wassereinsparungen berechnet wurden.

Diese Wassereinsparungen betragen in Abhängigkeit der Systemgröße 0,6–5,9 Mrd. m<sup>3</sup>/a (im Mittel 7,67 m<sup>3</sup>/(a \* kWp)). Durch die Simulation verschiedener Szenarien konnte zudem ein optimiertes Wassermanagement für die landwirtschaftliche Bewässerung abgeleitet werden. Ertragssimulationen zeigten auf, dass eine Floating-PV-Belegung von 45 % des Sees den aktuellen Strombedarf Afrikas bilanziell decken würde.



Das Projekt [»FPV4Resilience«](#) wird durch das [Leistungszentrum Nachhaltigkeit Freiburg](#) gefördert.

*Schwimmende PV-Anlage auf einem Baggersee nahe Leimersheim (Rheinland-Pfalz).*

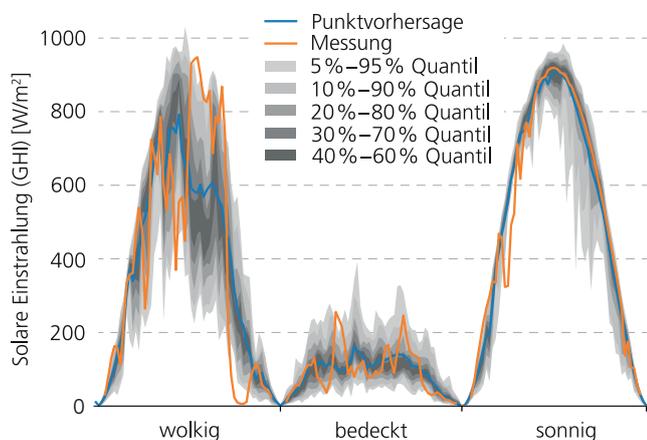
### Kontakt

Konstantin Ilgen  
Telefon +49 761 5488-5707  
konstantin.ilgen@ise.fraunhofer.de

# Probabilistische Vorhersagen der solaren Einstrahlung unter Nutzung von Satellitendaten



Wolken über der französischen Insel La Réunion, gelegen im Indischen Ozean; fotografiert von der Raumstation ISS.



Probabilistische Vorhersage (graue Bereiche) der solaren Einstrahlung vom 9. bis 11. Mai 2018 in Payerne, Schweiz.

## Kontakt

Tobias Zech  
 Telefon +49 761 4588-5036  
 tobias.zech@ise.fraunhofer.de

**Das Projekt »SOLREV« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klima (BMWK) gefördert.**

Die Stromproduktion aus Sonne und Wind ist vom Wetter abhängig – dies beeinflusst die Stromversorgung und Stromverteilung. Damit sich Strom aus erneuerbaren Energien besser in die Stromnetze integrieren lässt, sind meteorologische Vorhersagen hilfreich. Die Vorhersagen sind aber immer mit Unsicherheit behaftet. Probabilistische Vorhersagen liefern Wahrscheinlichkeitsverteilungen anstatt eines einzelnen Vorhersagewerts (Punktvorhersage). Mittels dieser Verteilungen können die Unsicherheiten prognostiziert und so Risiken und Kosten minimiert werden.

Im Projekt [»SOLREV«](#) entwickeln wir am Fraunhofer ISE probabilistische Vorhersagen der solaren Einstrahlung auf Basis von etablierten Punktvorhersageverfahren. Im Rahmen des Projekts sind wir als deutscher Partner an der [PVPS Task 16](#) »Solar Resource for High Penetration and Large Scale Applications« der International Energy Agency (IEA) zum Themengebiet solare Energiemeteorologie beteiligt. Wir haben uns innerhalb der Task an einem internationalen Benchmark von probabilistischen Vorhersagen beteiligt, den 2022 federführend die Universität de La Réunion durchgeführt hatte.

Die Unsicherheit von Vorhersagen der solaren Einstrahlung ist abhängig von der Wettersituation, insbesondere der Variabilität der Bewölkung. Situationen mit klarem Himmel oder bei vollständiger Bedeckung führen zu geringen Unsicherheiten, wohingegen durchbrochene Bewölkung zu großen Unsicherheiten führt (siehe Abbildung). Um diese unterschiedlichen Unsicherheiten abbilden zu können, suchen wir in der Vergangenheit nach ähnlichen Situationen anhand historischer Punktvorhersagen und leiten aus den dazugehörigen Messwerten die gesuchte Wahrscheinlichkeitsverteilung ab.

Unsere Punktvorhersagen berechnen wir aus drei Datenquellen, indem wir aktuelle Messwerte, satellitenbasierte Vorhersagen und numerischen Wettervorhersagen (NWP) mit maschinellen Lernverfahren kombinieren. Die satellitenbasierten Vorhersagen sind dabei ab ca. 30 Minuten besser als messwertbasierte und bis ca. 2 Stunden besser als NWP-basierte Verfahren. Die Vorhersagehorizonte von 15 Minuten bis 6 Stunden werden so optimal abgedeckt. Während Messwerte und NWP als Basis von probabilistischen Vorhersagen etabliert sind, ist die Nutzung von satellitenbasierten Vorhersagen in diesem Zusammenhang neuartig und führt im Benchmark zu einer wesentlichen Verbesserung der probabilistischen Vorhersagequalität.

# Digitalisierung von Forschungsdaten am Beispiel innovativer Batterietechnologien

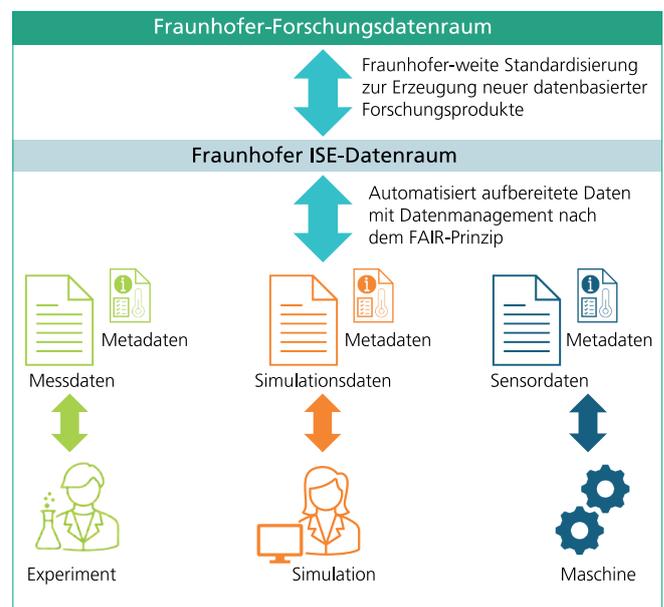
Die digitale Transformation in der Forschung eröffnet zahlreiche Möglichkeiten, innovative, datenbasierte Angebote und neue, digitale Geschäftsmodelle zu entwickeln. Für die Fraunhofer-Gesellschaft ist dieser Wandel Herausforderung und Chance zugleich, da die Digitalisierung neben dem Aufbau einer geeigneten Infrastruktur auch eine arbeitskulturelle Wende hin zu einem standardisierten Datenmanagement erfordert. Eine konsequente Digitalisierung der Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten wird künftig unabdingbar sein: einerseits, um die Vorgaben der nationalen und internationalen Förderinstitutionen im Umgang mit Daten zu erfüllen, andererseits, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können. Wir arbeiten am Fraunhofer ISE in der Batterieforschung in verschiedenen Projekten, darunter »Samba« und »Quaze«, auf dieses Ziel hin.

In den Projekten fallen unterschiedliche Arten von Forschungs- und Entwicklungsdaten an. Diese werden z. B. in der End-of-Line-Qualitätssicherung in der Batteriezellproduktion oder im Batterietestlabor gesammelt, in dem wir umfangreiche Zeitreihen durch Langzeituntersuchungen an Batteriezellen und -modulen erzeugen. Zudem nehmen wir Kurzzeitmessungen an komplexen Prüfständen vor. Die anfallenden Forschungsdaten werden aktuell meist nach individuellen Verfahren erhoben, ausgewertet und abgelegt.

Die Entscheidung, an welchem Ort und in welchem Format die Daten abgelegt und ausgewertet werden, liegt bei den Forschenden. Dies führt in der Praxis dazu, dass Rohdaten ohne die Metadaten, die den genauen Ablauf des Experiments, Umgebungsbedingungen oder den Versuchsaufbau dokumentieren, abgelegt werden. Zu einem späteren Zeitpunkt können diese Daten von anderen Forschenden dann nicht oder nur mit größerem Aufwand gefunden und meist nur unzureichend interpretiert werden. Dies schließt eine Zweitverwertung häufig aus. Gleichzeitig ist die Aufnahme von Metadaten aufwendig, da ihre Erhebung in der Regel nicht automatisiert erfolgt. Zudem ist zum Zeitpunkt der Messung oft nicht abschätzbar, welche Daten für eine Zweitverwertung relevant sind. Eine gute wissenschaftliche Praxis erfordert dennoch eine genaue Dokumentation und Rückverfolgbarkeit, um Experimente reproduzieren und nachvollziehen zu können.

Verschiedene Institute der Fraunhofer-Gesellschaft arbeiten daher an Konzepten für eine standardisierte und automatisierte Datenablage. Eine erste gemeinsame Konzeptualisierung

unter Beteiligung des Fraunhofer ISE entsteht beispielhaft in der Batterieforschung. Ziel ist die Entwicklung eines Datenraums, der eine institutsübergreifende, standardisierte Ablage und Verknüpfung von Daten nach dem FAIR-Prinzip erlaubt, wobei FAIR für auffindbar (findable), zugänglich (accessible), interoperabel (interoperable) und wiederverwendbar (reusable) steht. Der Aufbau einer digitalen Forschungsdateninfrastruktur treibt nicht nur die strategische Entwicklung digitaler Kompetenzen voran und steigert die Qualität aktueller Leistungsangebote. Er bietet auch die Möglichkeit, institutsübergreifend vollkommen neue, digitale Geschäftsmodelle zu entwickeln. Ein gutes Datenmanagement erleichtert die Datenanalyse und erlaubt die Auswertung großer Datenmengen mittels künstlicher Intelligenz, was wir in den beiden Verbundprojekten »Samba« und »Quaze« gemeinsam mit Industriepartnern verfolgen.



*Schematische Darstellung des Datenraums, der Daten zusammen mit Metadaten automatisch aufnimmt, aufbereitet und nach dem FAIR-Prinzip organisiert.*

## Kontakt

Dr. Moritz Kroll  
Telefon +49 761 4588-2554  
moritz.kroll@ise.fraunhofer.de



## Weltweit erster Mittelspannungs-Stringwechselrichter für zukünftige PV-Großkraftwerke

Für den geplanten Ausbau der Photovoltaik werden große Mengen an Rohstoffen benötigt, unter anderem Kupfer und Aluminium für Kabel und Transformatoren. Wir haben am Fraunhofer ISE im Projekt »MS-LeiKra« einen Stringwechselrichter entwickelt, der eine deutlich höhere Ausgangsspannung aufweist. Hierdurch können große Mengen an Ressourcen gespart werden. Denn aus der höheren Spannung resultieren ein kleinerer Strom und damit geringere Kabelquerschnitte.

Heutige Stringwechselrichter nutzen Ausgangsspannungen (Leiter-Leiter) zwischen 400 V<sub>AC</sub> und 800 V<sub>AC</sub>. Diese Spannung wurde in der Vergangenheit mit den steigenden Leistungen der Stringwechselrichter immer weiter angehoben. Durch die höhere Spannung sinkt bei gleicher Leistung der Strom und damit die stromabhängigen Verluste. In den letzten Jahren gab es allerdings keine weitere Anhebung der Spannung trotz weiter steigender Leistungen. Hierfür gibt es zwei Gründe: Erstens die Herausforderung, einen hocheffizienten und kompakten Wechselrichter für höhere Spannungen auf Basis von Silizium-Halbleitern zu bauen; zweitens die heute vorhandenen PV-spezifischen Normen gelten nur für den Bereich der Niederspannung. Dieser endet bei 1 500 V<sub>DC</sub> bzw. 1 000 V<sub>AC</sub>.

Die Einsparpotenziale, die durch eine weitere Erhöhung der Spannung erzielt werden könnten, zeigt das Bild unten links. Zugrunde liegt hier die Annahme eines Stringwechselrichters mit einer Leistung von 250 kVA. Bei einer heute möglichen Ausgangsspannung von 800 V<sub>AC</sub> wird nach DIN VDE 0298-4, Tabelle 9.2 ein minimaler Kabelquerschnitt von 120 mm<sup>2</sup> benötigt. Wird die Spannung auf 1 500 V<sub>AC</sub> erhöht, sinkt der Kabelquerschnitt auf 35 mm<sup>2</sup>. Bei einer Erhöhung auf 5 000 V<sub>AC</sub> bleiben nur noch 4 mm<sup>2</sup> erforderlicher Kupferquerschnitt. Da in einem PV-Großkraftwerk Kabellängen im zweistelligen Kilometerbereich verbaut werden, können also enorme Materialmengen eingespart werden.

Um die genannten Hürden zu überwinden, haben wir den weltweit ersten Mittelspannungs-Stringwechselrichter entwickelt und erfolgreich am Netz in Betrieb genommen (siehe Foto unten rechts). Der Wechselrichter hat eine Ausgangsspannung von 1 500 V<sub>AC</sub> bei einer Leistung von 250 kVA. Er ist zweistufig aufgebaut. Der Hochsetzsteller mit einer PV-Eingangsspannung von 1,7 kV bis 2,4 kV basiert auf 3,3-kV-Siliziumcarbid-(SiC)-Halbleitern. Der Wechselrichterteil wurde mit hybriden ANPC-Modulen (Active Neutral Point Clamped) aufgebaut. Hier kommen vier Silizium- und zwei SiC-Halbleiter zum Einsatz. Durch diese Topologie können bei nur minimal höheren Kosten die großen Vorteile von SiC genutzt werden. Mit dem Demonstrator konnte gezeigt werden, dass höhere Spannungen technisch umsetzbar sind und nun an einer Anpassung der Normen gearbeitet werden muss.



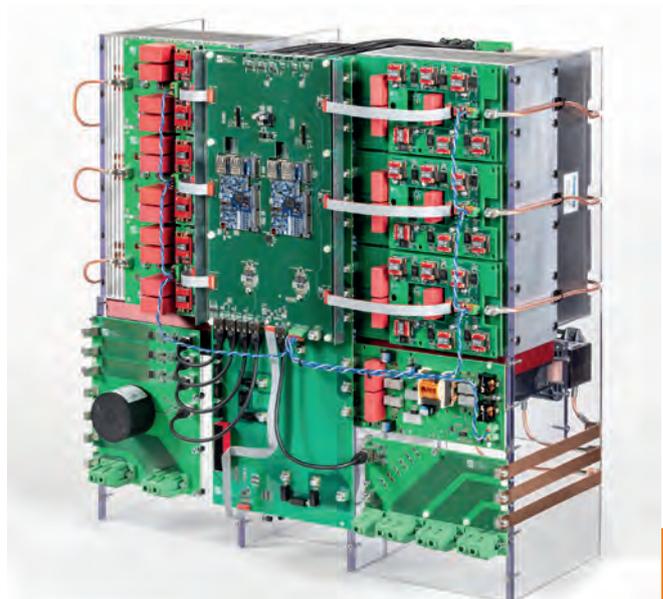
*Minimale Kabelquerschnitte für 250 kVA bei verschiedenen Spannungen im Vergleich.*

**Das Projekt »MS-LeiKra« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**

### Kontakt

Michael Geiss  
Telefon +49 761 4588-5069  
michael.geiss@ise.fraunhofer.de

*Mittelspannungs-Stringwechselrichter für zukünftige PV-Großkraftwerke. Leistung 250 kVA, Ausgangsspannung 1 500 V<sub>AC</sub>, PV-Spannung 1,7 kV<sub>DC</sub> ... 2,4 kV<sub>DC</sub>.*



# Electromagnetic-Transient-Modellierung (EMT) von Stromrichtern mittels standardisierter Schnittstellen

Der starke Zubau von Photovoltaik- und Windkraftanlagen sowie von Batteriespeichern und Elektrolyseuren stellt eine Herausforderung für den stabilen Betrieb unseres Versorgungsnetzes dar. Diese stromrichterbasierten Anlagen verhalten sich im Gegensatz zu konventionellen Anlagen, etwa synchronmaschinenbasierten Kraftwerken, dynamisch – ihr Verhalten wird maßgeblich durch softwarebasierte Regelalgorithmen definiert. Generell ist dieser Umstand von Vorteil, jedoch bedarf es eines harmonisierten Regelwerks zur Wahrung der Interoperabilität. Von zentraler Bedeutung sind hierbei Prüf- und Validierungsmethoden, um das ordnungsgemäße Verhalten der Anlagen überprüfen zu können.

Für die Validierung des Anlagenverhaltens stehen verschiedene Ansätze zur Verfügung. Ein triviales Verfahren ist die Vermessung der Anlage in einem Prüflabor in verschiedenen Betriebszuständen. Allerdings lässt sich eine ganzheitliche Charakterisierung hierbei nur bedingt realisieren, da beispielsweise die Bedingungen am Anschlusspunkt der Anlage von vielen Faktoren abhängen. Für Anlagen großer Leistung müssen darüber hinaus entsprechende Laborkapazitäten zur Verfügung stehen. Eine Alternative stellt die simulative Analyse dar. Hierfür werden Anlagen und Netzbetriebsmittel zunächst mathematisch modelliert. Mittels geeigneter Simulationsumgebungen lassen sich dadurch elektrische Netze ganzheitlich nachbilden. Dies geschieht häufig, gerade im Bereich der Übertragungs- und Verteilnetzbetreiber, mittels hochdynamischer Electromagnetic-Transient-Simulationen (EMT).

*Steuerhardware-Validierung mittels Hardware-in-the-Loop-(HIL)-Anwendung und standardisierter Schnittstelle.*

Im Rahmen des Austauschs von Anlagenmodellen, etwa zwischen Netzbetreibern und Anlagenherstellern, ergeben sich zwei wesentliche Herausforderungen: erstens Regelalgorithmen, die das Anlagenverhalten definieren, gehören zu dem nicht-öffentlichen, geistigen Eigentum des jeweiligen Herstellers. Zweitens wird eine Kompatibilität bevorzugt, die unabhängig von der Simulationsumgebung ist.

Um diese Herausforderungen anzugehen, haben wir am Fraunhofer ISE zusammen mit der TransnetBW GmbH Verfahren zur Kapselung der Regelalgorithmen durch Kompilierung in dynamische Bibliotheken, sogenannte DLLs, entwickelt. Der Vorteil dieses Verfahrens liegt darin, dass die Regelalgorithmen nicht mehr in lesbarer oder nachvollziehbarer Art vorliegen und das geistige Eigentum des Herstellers gewahrt bleibt. Ein weiterer zentraler Aspekt bei der Entwicklung von Anlagenmodellen ist die Einbindung in beliebige Simulationsumgebungen. Hierfür wurde die Eignung des Schnittstellenspezifikationsvorschlags [»ENTSO-E Standardized control interface for HVDC SIL/HIL conformity tests«](#) für allgemeine Stromrichtersysteme analysiert.

Am Beispiel eines dreiphasigen 500-kVA-Wechselrichters haben wir demonstriert, wie gekapselte DLL-Modelle erstellt und einheitliche Schnittstellen für hochdynamische EMT-Simulationen implementiert werden können. Untersucht wurden sowohl reine Offline-Simulationen (SIL), exemplarisch in der Simulationsumgebung PSCAD, als auch die Eignung von Standardschnittstellen für Hardware-in-the-Loop-(HIL)-Anwendungen. Die erstellten Modelle und Simulationen konnten wir anhand hochaufgelöster Labormessungen des realen Systems validieren.



## Kontakt

Benjamin Stickan  
Telefon +49 761 4588-2125  
benjamin.stickan@ise.fraunhofer.de



## Auswirkungen dezentraler elektrischer Speichersysteme auf das Niederspannungsnetz

Sogenannte Prosumer beziehen nicht nur elektrische Energie, sie produzieren diese auch und nehmen zunehmend aktiv am Energiemarkt teil. Ein Beispiel für Prosumer sind Betreiber und Betreiberinnen von zuletzt stark in der Anzahl angestiegenen »Balkonkraftwerken« an Fassaden und von PV-Dachanlagen. Auf der Stromnutzerebene kommen besonders in Neubaugebieten Wärmepumpen für die Wärmeversorgung hinzu; auch die Zahl der Elektrofahrzeuge steigt schnell. Diese neuen elektrischen Komponenten werden zunehmend durch Energiemanagementsysteme aktiv gesteuert, um die Kosten für elektrische Energie zu minimieren.

In einem Energiesystem, das immer mehr auf erneuerbaren Energien basiert, wird Flexibilität auf der Nachfrageseite und somit das Verhalten der Prosumer immer wichtiger. Energiemanagementsysteme steuern hierbei in der Regel den Verbrauch so, dass so viel Strom wie möglich aus der eigenen Photovoltaikanlage genutzt wird. Eine andere Möglichkeit besteht darin, den Strom für das Elektrofahrzeug, den Speicher und die Wärmepumpe gemäß den schwankenden Preisen von dynamischen Tarifen zu optimieren. Zunehmend entwickeln sich auch Unternehmen zu Prosumern, indem sie ihren Verbrauch an der eigenen Photovoltaikerzeugung orientieren, um unabhängiger vom Strommarkt zu werden.

Am Fraunhofer ISE untersuchen wir im Projekt [»MAPSEN«](#) anhand von Modellierungen, wie sich die steigende Verbreitung von Prosumern auf die Strommärkte und Stromnetze auswirkt. Das deutsche Stromnetz ist nicht so ausgelegt, dass eine große Zahl an Prosumeranlagen wie Solaranlagen und

Elektrofahrzeugen ungesteuert betrieben werden können; dies wäre nur bei einem starken Netzausbau möglich und lässt sich an einem Beispiel verdeutlichen: Durch Veränderungen im Energiesystem für ein exemplarisches ländliches Gebiet mit 1057 Anschlussnehmern müssten 767 Meter Kabel verlegt werden, was 2,5 % der gesamten Leitungslänge in dem Gebiet entspricht. Außerdem müssten drei der insgesamt 16 Transformatoren (19 %) ausgetauscht werden. Diese Ausbauanforderungen machen die enormen Herausforderungen deutlich, vor denen die Verteilnetzbetreiber in den nächsten Jahren stehen.

Um die Netzintegration zu unterstützen, schlagen wir netzdienliches Verhalten der Prosumer als Lösungsansatz vor. Dies bedeutet etwa, dass die Prosumer ihre Energiespeicher dann laden, wenn die Sonne in voller Stärke scheint. Oder sie erlauben dem Netzbetreiber, Elektrofahrzeuge, erst nachts zu laden und nicht abends, wenn viele Autofahrerinnen und -fahrer nach Hause kommen. Durch diese Maßnahmen bzw. Verhaltensänderungen können nach unseren Berechnungen die Spitzenbelastungen des Netzes reduziert und Netzausbaukosten um über 30 % gesenkt werden. Im Projekt »MAPSEN« entwickeln wir Tools, die Netzbetreibern helfen, das Verhalten von Prosumern und die Effekte von netzdienlichen Anreizen zu quantifizieren.

**Das Projekt »MAPSEN« wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**

*Solaranlagen auf Balkonen werden immer beliebter. Wie die netzdienliche Integration von solchen Prosumeranlagen gestaltet werden kann, erforschen wir am Fraunhofer ISE.*

### Kontakt

Wolfgang Biener  
Telefon +49 761 4588-5893  
wolfgang.biener@ise.fraunhofer.de





## Neue Verfahren zur Gewinnung von Rohstoffen aus geothermalen Solen

Lithium ist ein für die Energiewende elementar wichtiger Rohstoff und damit wirtschaftsstrategisch von großer Bedeutung. Da der globale Lithiumbedarf bis 2030 drastisch steigen wird, werden neue Verfahren zu dessen Gewinnung benötigt – zumal Deutschland derzeit reiner Importeur ist und somit von internationalen Lieferketten abhängig.

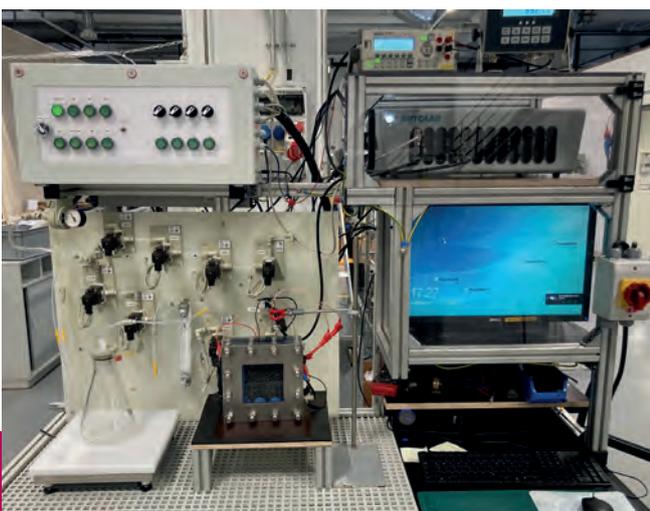
Aus deutschen Geothermalquellen lassen sich neben Wärme auch Rohstoffe wie Lithium gewinnen, was zukünftig zur strategischen Sicherung von Rohstoffressourcen beitragen kann. Am Fraunhofer ISE entwickeln wir daher verfahrenstechnische Anlagen zur Wertstoffgewinnung aus solchen geothermalen Quellen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Wertstoffe, die üblicherweise in sehr geringer Konzentration vorliegen (der Lithiumgehalt im Oberrheingraben beträgt ca. 160 mg/l), durch Aufkonzentration der Sole so weit anzureichern, dass eine Fällung möglich ist. Dabei besteht die Herausforderung darin, die Auskristallisation anderer Stoffe wie Silikate kontrollieren zu können, um Verblockungen der Anlagen zu vermeiden. In dem deutsch-chilenischen Projekt »BrineMine« haben wir eine verfahrenstechnische Prozesskette entwickelt, bei der zunächst eine chemische Stabilisierung der Silikatphasen vorgenommen wird, bevor eine erste Aufkonzentration (Faktor 8) durch Umkehrosmose erfolgt. Während das Permeat als Frischwasser zur Verfügung steht, wird in dem Konzentrat die Silikatphase durch Zugabe von Kalzium gefällt und die Präzipitate über einen Vakuumtrommelfilter abgetrennt. Eine Weiterprozessierung und Valorisierung des Silikats ist denkbar. Das Konzentrat der Umkehrosmose wird dann durch Membrandestillation bis zu einem Faktor 16 weiter aufkonzentriert. Die für die Destillation erforderliche Antriebswärme wird direkt aus der Geothermalsole gewonnen. 2021 haben wir eine Demonstrationsanlage in einem Geothermiekraftwerk im südpfälzischen Insheim erfolgreich in Betrieb genommen – und 2023 eine weitere in einer Therme in Puyehue, Chile.

*In der Demonstrationsanlage im Geothermiekraftwerk Insheim werden Fällungspräzipitate mittels Trommelfilter abgetrennt und ausgeschleust.*



Darüber hinaus arbeiten wir an der Entwicklung hoch selektiver Trennprozesse, die auch unter hoher Temperatur und Druck ablaufen können, sodass wir gezielt einzelne Elemente direkt aus der Sole gewinnen. Wir entwickeln dazu mit Partnern sogenannte Lithium-Ionen-Pumpen. Diese basieren auf einem Elektrodenpaar bestehend aus einer Lithiummanganoxyd-Elektrode (LMO-Elektrode) und einer Nickelhexacyanoferrat-Gegen-Elektrode (NiHCF-Elektrode). Durch Anlegen einer Spannung lagert sich zunächst Lithium in die LMO-Elektrode ein. Bei Umkehr der Spannung werden Kaliumionen in die NiHCF-Elektrode eingelagert, während die Lithiumionen freigegeben und in einer Rückgewinnungslösung angereichert werden. Wir haben verschiedene Zellkonzepte mit Elektrodenflächen von 7 cm<sup>2</sup> bis 100 cm<sup>2</sup> Größe entwickelt und in einem dafür aufgebauten Teststand untersucht. Nun arbeiten wir an Verfahren und Methoden zur Herstellung und Hochskalierung der Elektroden für größere Modulstacks.

**Das Projekt »BrineMine« wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.**



*Teststand mit Potentiostat zur Vermessung und Charakterisierung von elektrochemischen Zellen in der Lithiumgewinnung aus Solen.*

### Kontakt

Dr.-Ing. Joachim Koschikowski  
Telefon +49 761 4588-5294  
joachim.koschikowski@ise.fraunhofer.de

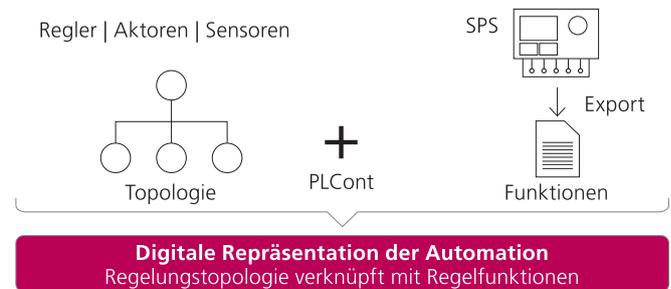


## Methode für eine vollständige digitale Repräsentation der Automation gebäudetechnischer Anlagen

Das Planen, Bauen und Betreiben von Gebäuden wird zunehmend digitaler. Die steigende Komplexität von Gebäuden lässt sich so besser abbilden, wodurch u. a. die Energieeffizienz gesteigert werden kann. Eine Methodik, digitalisierte Informationen zu gebäudetechnischen Anlagen für alle Baubeteiligten bereitzustellen, ist das Building Information Modeling (BIM). Es erlaubt den Zugriff über alle Lebenszyklusphasen eines Bauwerks hinweg und zu jedem Zeitpunkt für verschiedene Aufgaben, beispielweise die energetische Betriebsoptimierung der Technischen Gebäudeausrüstung (TGA). Hierfür ist eine durchgängige und systematische Verknüpfung der Bereiche TGA, Gebäudeautomation und -betrieb mittels BIM notwendig. Im Projekt »Energie.Digital« haben wir in Zusammenarbeit mit der RWTH Aachen und der Firma Viega eine Methode für eine solche integrale digitale Beschreibung der TGA entwickelt und die Anwendung an einem Leuchtturmvorhaben, dem Neubau des Seminarcenters Viega World in Attendorn, Nordrhein-Westfalen, demonstriert.

Den Schwerpunkt haben wir am Fraunhofer ISE auf die Entwicklung einer Methode zur vollständigen digitalen Repräsentation der Steuerung und Regelung gebäudetechnischer Anlagen in BIM gelegt. Die heute oft in Papierform vorliegende Funktionsbeschreibung der TGA wird dabei durch ein digitales Modell ergänzt, das von der Planungs- bis zur Betriebsphase mit Informationen angereichert und aktualisiert wird. Die Methode umfasst die Abbildung der Regler, Sensoren und Aktoren durch Semantic-Web-Technologien mit vorhandenen Ontologien und der von uns entwickelten PLCont-Ontologie. Darüber hinaus werden die Steuer- und Regelungsfunktionen, die auf den Speicherprogrammierbaren Steuerungen (SPS) implementiert sind, digital und standardisiert abgebildet.

**Das Projekt »Energie.Digital« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK gefördert.**



*Mit der PLCont-Ontologie können Regelungstopologie und SPS-Funktionen zu einer vollständigen digitalen Repräsentation der Automation verknüpft werden.*

Die digitale Repräsentation der Automation ermöglicht es, die gesamte Anlage inklusive ihrer Regelung als Teil des BIM-Modells darzustellen. Außerdem können Nutzerinnen und Nutzer auf eine »as programmed«-Darstellung der Funktionen außerhalb der SPS zugreifen, wodurch geplante und tatsächlich umgesetzte Regelung abgeglichen werden können. Dafür haben wir eine prototypische grafische Oberfläche entwickelt, in der die Inhalte der ontologiebasierten Beschreibung der Regelung (digitales Anlagenschema, Regelungsparameter, Funktionsbeschreibung und SPS-Code) digital abgebildet werden.

Das Seminarcenter Viega World wurde als klimaneutrales Gebäude geplant und im Januar 2023 in Betrieb genommen. Im Rahmen des wissenschaftlichen Monitorings überprüfen wir Soll- und Ist-Performance des Seminarcenters. Wir konnten bereits beispielhaft zeigen, dass die digitale Repräsentation der Regelung bestimmte Prozesse der Betriebsüberwachung und der energetischen Betriebsoptimierung vereinfachen und beschleunigen kann.

*Das klimaneutrale Seminarcenter Viega World in Attendorn, Nordrhein-Westfalen.*

### Kontakt

Moritz Ihlenburg  
 Telefon +49 761 4588-2377  
 moritz.ihlenburg@ise.fraunhofer.de





## Den Anwendungsbereich für thermisch angetriebene Adsorptionskälteanlagen erweitern

Die Kühlung von Gebäuden und Prozessen verursacht bereits heute erhebliche CO<sub>2</sub>-Emissionen – und der Bedarf an aktiver Kühlung steigt. Dabei kommt derzeit vor allem die elektrisch betriebene Kältdampfkompensation zum Einsatz. Dort werden aber häufig noch Kältemittel verwendet, die ein hohes Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) aufweisen. Die Kältebranche steht demnach vor der Herausforderung, auf klimafreundlichere Kältemittel umzusteigen und den Strombedarf zu verringern. Daran arbeiten wir am Fraunhofer ISE in mehreren Forschungsprojekten.

Thermisch betriebene Kühltechnologien (Ad- und Absorptionskältemaschinen) nutzen Abwärme oder erneuerbare Wärme als Antriebsenergie anstelle von Strom und verwenden natürliche Kältemittel wie Wasser oder Ammoniak (GWP=0). Im Forschungsverbund »SubSie« untersuchten fünf Konsortien mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft, wie Sorptionsanlagen mit dem Kältemittel Wasser einen erweiterten Einsatzbereich adressieren können, insbesondere auch hin zu Temperaturen um den Gefrierpunkt und darunter ([»SubSie-Plattform«](#)).

Am Fraunhofer ISE haben wir in Kooperation mit der Firma Fahrenheit Adsorptionskälteanlagen (AdKM) weiterentwickelt (Projekt »SubSie-SubKon«). In diesen Anlagen wird das Kältemittel Wasser verdampft und an einem festen Sorptionsmittel wie Silikagel oder Zeolith adsorbiert. Die Grundkonfiguration einer AdKM besteht aus drei Komponenten: Erstens einem als Adsorber bezeichneten Wärmeübertrager, der im Adsorptionshalbzzyklus den Kältemitteldampf aus dem Verdampfer aufnimmt, zweitens dem Kondensator, in dem das desorbierte

Wasser kondensiert, und drittens dem Verdampfer, in dem die Kühlwirkung erzielt wird. In noch einfacheren Konfigurationen arbeitet derselbe Wärmeübertrager abwechselnd als Kondensator und Verdampfer. Die Funktionsweise wird dann nur durch Umschalten der Temperaturniveaus an Adsorber und Verdampfer/Kondensator geändert. Die Wahl der Zykluszeit im Betrieb erlaubt eine Optimierung im Hinblick auf die Leistung und die Effizienz (Coefficient of Performance, COP).

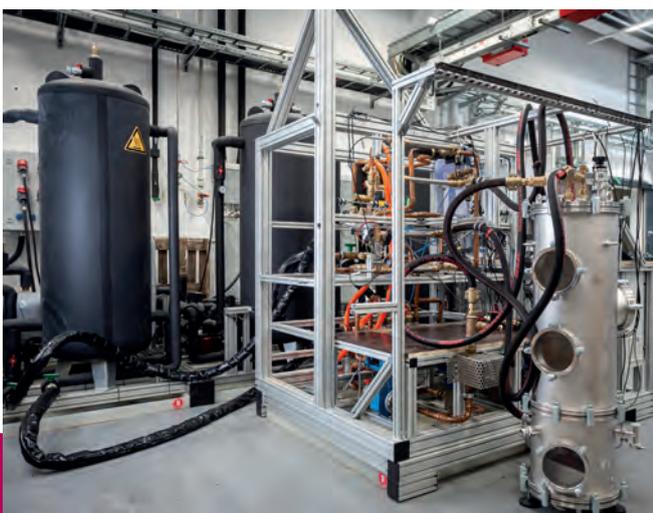
In Untersuchungen an innovativen Verdampfern konnten wir zeigen, dass die Sublimation aus einem dünnen Eisfilm ohne Beschädigung des Wärmeübertragers und ohne wesentliche Reduktion der thermischen Leistungsfähigkeit des Verdampfers erfolgen kann.

Auch ganze Adsorptionsmodule wurden bei Kältebereitstellungstemperaturen von unter 3°C untersucht. Das Wasser im Verdampfer gefriert bei dieser Betriebsweise zwischenzeitlich.

Die Kälteleistung des Moduls in diesem Betriebspunkt wird bei gleichem COP um etwa 30 % reduziert gegenüber dem Leistungspunkt bei einer Verdampfer-Eintrittstemperatur von 15°C (Kältebereitstellung etwa 12°C). Bei Zykluszeiten, die zu gleicher Leistung bei beiden Temperaturbedingungen führen, reduziert sich der COP bei den niedrigen Temperaturen um etwa 20 %.

Bei Temperaturen unter 5°C bieten sich Anwendungen beispielsweise in der Lebensmittelindustrie an, die bisher mit Adsorptionskälteanlagen nicht adressiert werden konnten.

*Teststand zur Charakterisierung von Adsorptions-Wärmepumpen am Fraunhofer ISE.*



**Der Projektverbund »SubSie« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**

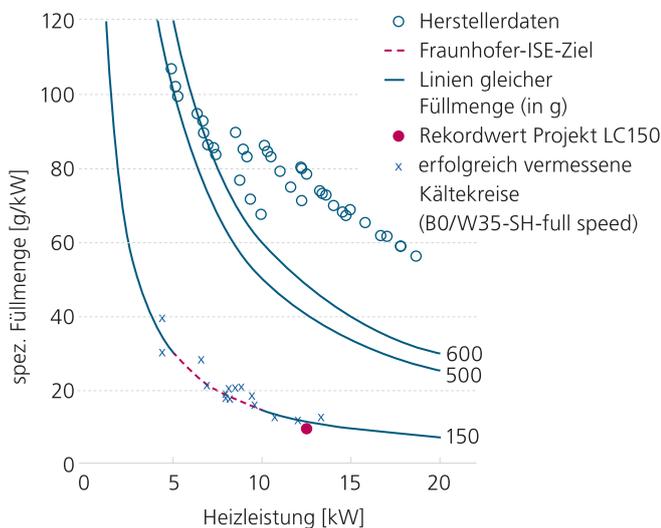
### Kontakt

Dr. Gerrit Földner  
Telefon +49 761 4588-5527  
gerrit.fueldner@ise.fraunhofer.de



## Wärmepumpen mit Propan für den Markt entwickeln

Damit Deutschland bis 2045 klimaneutral werden kann, muss der Gebäudesektor, der für rund 40 Prozent des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes (inklusive vorgelagerter Prozesse) verantwortlich ist, seinen Anteil dazu beitragen. Dies kann mit dem weiteren Einbau von Wärmepumpen gelingen, da sie bei der Bereitstellung von Wärme ein hohes Potenzial haben, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken. Das Herzstück von Wärmepumpen ist der Kältekreis. In ihm fließt ein Kältemittel, das bei niedriger Temperatur verdampft. Um Heizwärme zu erzeugen, nimmt das Fluid zuerst Wärme aus der Umwelt auf, anschließend wird das Kältemittel als Dampf in einem Verdichter komprimiert. Das Problem: Derzeit nutzen Wärmepumpen in den meisten Fällen Kältemittel mit fluorierten Gasen (F-Gasen) mit erheblichem Treibhauspotenzial. Die aktuelle Fassung der Kältemittelverordnung der EU (F-Gas-Verordnung) sieht eine signifikante Reduktion der Verwendung von Substanzen mit hohem Treibhauspotenzial in den kommenden Jahren vor. Zudem sollen ganze Stoffgruppen aufgrund ihres Gefährdungspotenzials für Mensch und Umwelt stufenweise verboten werden. Dies erhöht den Anreiz, Lösungen mit natürlichen Kältemitteln zu suchen.



*Ziel des Projekts »LC150« war es, mit weniger als 150 Gramm Propan eine Heizleistung zwischen fünf und zehn Kilowatt zu erreichen. Das Projektziel wurde übertroffen.*

### Kontakt

Dr.-Ing. Hannes Fugmann  
 Telefon +49 761 4588-2353  
 hannes.fugmann@ise.fraunhofer.de

Umweltfreundliche Alternativen sind daher dringend erforderlich. In Frage kommt etwa Propan (R290), das günstig ist und ein niedriges Treibhauspotenzial aufweist. Propan hat zudem sehr gute thermodynamische Eigenschaften, die eine höhere Effizienz gegenüber Wärmepumpen mit konventionellen Kältemitteln ermöglichen. Die Herausforderung: Propan ist brennbar. Für das Kältemittel gelten deshalb umfangreiche Sicherheitsauflagen für die Nutzung in Wärmepumpen. Übersteigt eine Wärmepumpe im Einfamilienhaus mit ihren üblichen fünf bis zehn Kilowatt Heizleistung die vorgeschriebene Höchstmenge von 150 Gramm Kältemittel, kann sie nur mit erhöhten Sicherheitsanforderungen installiert werden. Eine Neuentwicklung des Fraunhofer ISE könnte dies ändern. In dem nun abgeschlossenen »Projekt LC150« (»low charge 150 g«) entwickelten wir gemeinsam mit einem Konsortium aus Wärmepumpenherstellern einen kältemittelreduzierten Propan-Kältekreis. Eine damit ausgestattete Sole-Wärmepumpe erreicht mit 124 Gramm Propan bereits rund 12,8 Kilowatt Heizleistung und könnte somit auch ohne zusätzliche Sicherheitsvorkehrungen im Inneren von Häusern aufgestellt werden. Pro Kilowatt Leistung sind nur rund zehn Gramm Propan erforderlich. Das ist ein neuer Rekord.

Die Gesamteffizienz der Wärmepumpe (seasonal coefficient of performance) wurde durch Gewichtung von Labormessdaten verschiedener charakteristischer Betriebspunkte bestimmt. Sie beschreibt das Verhältnis der erzeugten Wärme zum eingesetzten Strom und lag bei 4,7. Für den Prototyp wurden marktverfügbare Komponenten verwendet. Ein wesentlicher Baustein des Konzepts ist die konsequente Vermeidung von Bereichen im Kältekreis, die nicht zum Wärmeübergang oder zur Druckanpassung beitragen. Damit können eingesetzte Kältemittelmengen enorm reduziert werden. Auch in Mehrfamilienhäusern sollen Propan-Wärmepumpen zum Einsatz kommen. Im neuen Projekt »LCR290« planen wir die Entwicklung von einfach anwendbaren und multiplizierbaren Wärmepumpen-Lösungen für den Austausch von Gas- und Ölheizungen in Mehrfamilienhäusern. Hierbei wird wieder auf Propan als Kältemittel gesetzt, die Kältemittel-Füllmengen erneut auf ein Minimum reduziert und neue Sicherheitskonzepte für die verbleibende Menge Propan entwickelt. Für die praxisnahe und schnelle Umsetzung wurde ein Projektkonsortium mit Unternehmen der Heizungsbranche und der Wohnungswirtschaft gegründet.

**Das Projekt »LC150« wurde und das Projekt »LCR290« wird vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**



## Effiziente Dekarbonisierung der Wärme- und Kältebereitstellung durch innovative thermische Speicher

Im Zuge des Ausbaus erneuerbarer Energien sowie zur Flexibilisierung und Sektorkopplung werden thermische Energiespeicher für die bedarfsgerechte Bereitstellung von Wärme oder Kälte immer relevanter. Um die Verbreitung der Speichersysteme zu unterstützen, sind innovative Ansätze zur Kostensenkung gefragt. Eine Möglichkeit ist, die in Hochtemperatur-Wärmespeichern verwendeten, teuren Fluide teils durch günstige Füllkörper zu ersetzen. Im Forschungsprojekt »FENOPTHES« haben wir am Fraunhofer ISE diesen Ansatz weiterverfolgt und den bestehenden Teststand für Salzschnmelze-Speicher um einen zusätzlichen Speichertank erweitert. In diesen haben wir eine Schüttung aus Füllkörpern eingebracht (Abbildung rechts), die aus verschiedenen recycelten, temperaturbeständigen Materialien (z. B. Schlacke) bestehen und durch einen phosphathaltigen Binder auch bei hohen Temperaturen stabil sind. Diese Materialien stehen in direktem Kontakt mit einer flüssigen Salzmischung aus 60 % Natriumnitrat ( $\text{NaNO}_3$ ) und 40 % Kaliumnitrat ( $\text{KNO}_3$ ). Die Arbeitstemperaturen liegen typischerweise zwischen 290 °C und 550 °C. Die Be- und Entladung des Systems wurde bei verschiedenen Massenströmen und Temperaturen untersucht. Im Zyklusbetrieb wurde eine vielversprechende Speichereffizienz von 98 % und eine Nutzungsrate von 73 % erzielt. Insgesamt zeigen die Projektergebnisse, dass Salzschnmelze-Speicher mit Füllkörpern eine wirtschaftlich interessante Lösung für die Prozesswärme in der Industrie darstellen.

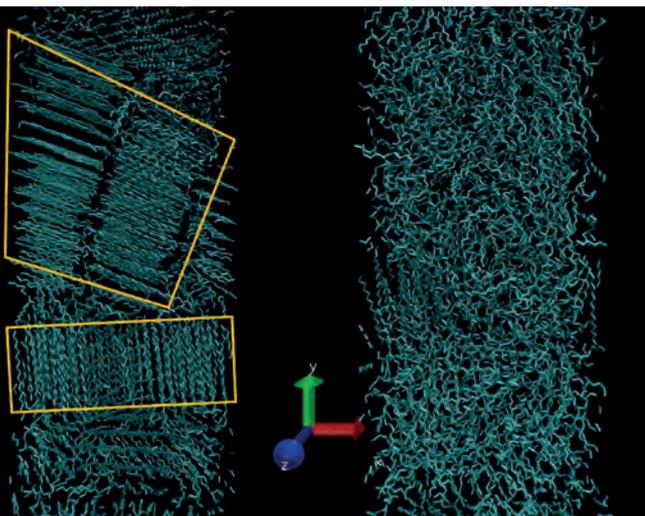
Darüber hinaus setzen wir am Fraunhofer ISE auf den isothermen Phasenübergang von Phasenwechselmaterialien (PCM), um kompakte Speicher mit hoher Kapazität und geringer Temperaturspreizung im niedrigen Temperaturbereich zwischen 0 und 100 °C zu realisieren. Dabei sind die Materialeigenschaften im festen Zustand des PCM oft limitierend, etwa im Hinblick auf die Wärmeübertragungsleistung. Indem das PCM in einer Flüssigkeit dispergiert wird, bleibt es selbst

*Salzschnmelze-Schüttgutspeicher nach Bestückung mit Füllmaterial.*



im kristallisierten Zustand pumpfähig und überwindet diese Einschränkung. Als Technologie für thermische Speicher entwickeln wir daher PCM-Slurries (PCS). Durch ihre hohe Wärmekapazität können sie gleichzeitig als Wärmespeicher-material und -trägerfluid genutzt werden. Bei PCS kommt es durch Unterkühlung zu einer Differenz zwischen Schmelz- und Kristallisationstemperatur. Im Projekt »MINAKRIP« wurden in Experimenten und mittels molekulardynamischer Simulationen Keimmaterialien für die Reduktion der Unterkühlung untersucht. Die Simulationen ermöglichen, die Kristallbildung und die Wirkung der Keime auf atomarer Ebene (Abbildung unten) besser zu verstehen. Für eine Paraffin-Wasser-Emulsion konnte die Unterkühlung mit einem optimierten Keim um 9 K verringert werden. Aufbauend auf den Ergebnissen wird es in Zukunft möglich sein, PCM-Slurries mit engem Temperaturbereich zu entwickeln und damit für zahlreiche weitere Anwendungen nutzbar zu machen.

**Die Projekte »FENOPTHES« und »MINAKRIP« wurden vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**



*Phasenübergang von PCM-Molekülen zwischen festem (links) und flüssigem Zustand (rechts) in einer MD-Simulation. Gelbe Rahmen: PCM-Kristallite.*

### Kontakt

Moritz Kick  
Telefon +49 761 4588-2097  
moritz.kick@ise.fraunhofer.de

## Feldmessung zur Effizienz- und Schallbewertung von Wärmepumpen im Einfamilienhausbestand

Wärmepumpen spielen eine wichtige Rolle bei der nachhaltigen Transformation des Gebäudesektors. Diese Transformation kann aber nur umgesetzt werden, wenn Wärmepumpen auch in Bestandsgebäuden flächendeckend zum Einsatz kommen, was jedoch mit verschiedenen Herausforderungen – etwa der Erschließung geeigneter Wärmequellen sowie den zum Beheizen der Gebäude erforderlichen, höheren Temperaturen – verbunden ist.



*Historisches Einfamilienhaus mit Außenluft-Wärmepumpe.*



*Außenluft-Wärmepumpe mit zusätzlicher Schallmess-technik vor einem Einfamilienhaus von 1955.*

Gemeinsam mit neun Wärmepumpenherstellern und zwei Energieversorgern verfolgen wir im Rahmen des Projekts [»WP-QS im Bestand«](#) bis Ende 2024 gleich mehrere Forschungsfragen zum Einsatz von Wärmepumpen in bestehenden Einfamilienhäusern. Um den Stand der Technik zu demonstrieren und Optimierungsmöglichkeiten abzuleiten, sollen bis zu 75 Wärmepumpen in Gebäuden der Baujahre 1826 bis 2001 messtechnisch untersucht und hinsichtlich Effizienz und Betriebsverhalten analysiert werden. Weitere Schwerpunkte sind die Messung der Schallbelastung durch Außenluft-Wärmepumpen sowie Untersuchungen zu bivalenten Systemen und zur PV-Eigenstromnutzung.

Erste Zwischenergebnisse der Effizienzanalyse betreffen die Messperiode Februar 2022 bis Januar 2023. Die in diesem Zeitraum ausgewerteten 21 Außenluft-Wärmepumpen erreichten eine mittlere Jahresarbeitszahl (JAZ, kombinierte Erzeugereffizienz für Raumheizung und Trinkwassererwärmung) von 3,3 bei einer Bandbreite von 2,4 bis 4,1. Die JAZ der acht, mit Erdwärmesonden ausgestatteten Erdreich-Wärmepumpen, reichten von 3,6 bis 5,4. Verglichen mit einem Gaskessel als Referenzwärmeerzeuger würden die Einsparungen an Treibhausgasemissionen, unter Berücksichtigung der geringsten und höchsten gemessenen JAZ, zwischen 18 % und 64 % liegen. Im Jahr 2030, etwa zum Zeitpunkt der mittleren Nutzungsdauer der Wärmepumpen, würden die Einsparungen zwischen 58 % und 81 % sowie 77 % und 90 % liegen, je nachdem, welches Tempo beim Ausbau der erneuerbaren Energien im Stromsektor angenommen wird.

Die Zwischenergebnisse der Effizienzanalyse zeigen bereits die ökologischen Vorteile der Wärmepumpen gegenüber fossil betriebenen Kesseln. Ziel ist es, die Datenbasis nun weiter zu vergrößern, die Schallmessdaten im Detail zu analysieren und anhand tiefergehender Betriebsanalysen Maßnahmen zur Qualitätssicherung für den effizienten Betrieb von Wärmepumpen abzuleiten. Unsere Forschungen können damit wesentlich zum schnellen Hochlauf von effizient betriebenen Wärmepumpen im adressierten Anwendungsbereich beitragen.

### Kontakt

Danny Günther  
Telefon +49 761 4588-5371  
danny.guenther@ise.fraunhofer.de

# Photovoltaisch-thermische Kollektoren – neue Produktlösungen für einen wachsenden Markt

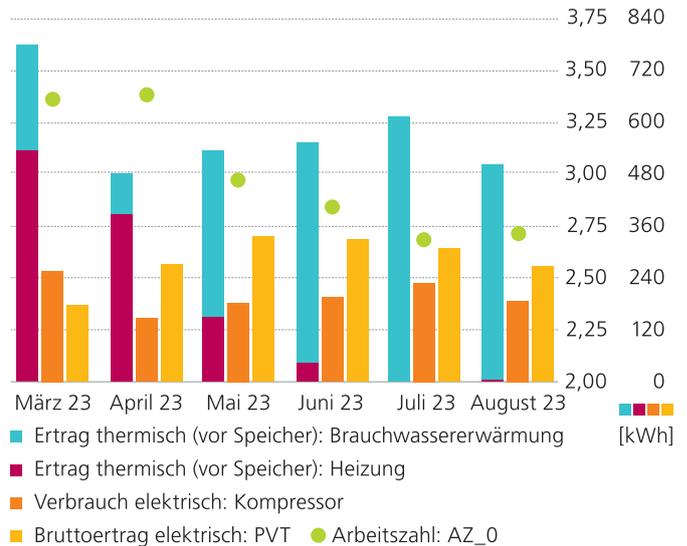
Photovoltaisch-thermische Kollektoren, kurz PVT-Kollektoren, erzeugen gleichzeitig Strom und Wärme aus Sonnenenergie. Kombiniert mit einer Wärmepumpe können diese Systeme zur effizienten und CO<sub>2</sub>-armen Bereitstellung von Raumwärme und Trinkwarmwasser genutzt werden und sind daher ein wichtiger Baustein unserer Forschung am Fraunhofer ISE auf dem Weg zur Energiewende. Im Vergleich zu Wärmepumpen mit Außenlufteinheit haben PVT-Kollektoren den Vorteil, dass sie keine Geräuschemissionen verursachen, den erzeugten Strom selbst nutzen sowie aufgrund solar angehobener Quelltemperaturen potenziell effizienter arbeiten.

In den akkreditierten TestLabs [PV Modules](#) und [Solar Thermal Systems](#) haben wir PVT-Kollektoren, die wir im Rahmen von Forschungsprojekten gemeinsam mit unseren Industriepartnern entwickelt und gefertigt haben, umfassend charakterisiert. Auch kommerzielle Produkte und Prototypen verschiedener Hersteller wurden im Labor getestet. Dabei zeigte sich die Robustheit unserer methodischen Ansätze und Labormöglichkeiten.

Dank unserer industrienahen Forschung haben wir uns am Fraunhofer ISE eine herausragende Position bei der Begleitung von PVT-Neuentwicklungen von den Prototypen bis zum Markteintritt erarbeitet. Daher wird unser Angebot der entwicklungsbegleitenden Modulcharakterisierung als auch der Prüfung zur Marktzulassung von PVT-Modulen stark nachgefragt. Die zunehmende Relevanz von PVT-Kollektoren zur Energieversorgung von Gebäuden zeigt sich in der Aufnahme weiterer PVT-Demonstrationsanlagen in das Energiemonitoring des laufenden Projekts »[integraTE](#)«. Die Informationen über Systemverhalten und Energieflüsse sind online für unsere Kunden verfügbar und ermöglichen damit eine hohe Transparenz der Anlageneffizienz und -erträge, die für eine Technologiebewertung in einer frühen Marktphase wichtig ist (siehe Grafik).



Abgedeckter PVT-Kollektor mit Low-E-Verglasung beim Leistungstest auf dem Außenteststand des TestLab Solar Thermal Systems am Fraunhofer ISE.



*Thermische Erträge für Brauchwassererwärmung und Heizung, elektrische Erträge und Verbrauch des Wärmepumpenkompressors sowie monatliche Mittelwerte der Arbeitszahl AZ\_0 eines PVT-Systems mit abgedeckten PVT-Kollektoren. Ein Teil des erzeugten Stroms der PVT-Kollektoren kann direkt für den Antrieb der Wärmepumpe verwendet werden. Die thermischen Erträge werden dabei an einer Bilanzmessstelle zwischen Wärmepumpe und thermischem Speicher gemessen und in der Datenauswertung Heizung oder Brauchwassererwärmung zugeordnet. Die AZ\_0 berücksichtigt nur die vom Kompressor aufgenommene Leistung für die elektrische Bilanzierung.*

Durch Vorträge und Schulungen z. B. in der Ausbildung von Energieberatern und -beraterinnen sowie dem Fachhandwerk konnten wir einen wichtigen Beitrag zur Ausbildung von Fachkräften im Gebäudebereich leisten.

**Das Projekt »integraTE« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**

## Kontakt

Dr. Korbinian Kramer  
Telefon +49 761 4588-5139  
korbinian.kramer@ise.fraunhofer.de



## Standardisierte BIPV-Fassadenelemente mit integrierter Leistungselektronik



*Demonstrator am Fraunhofer ISE. Obere zwei Reihen: BIPV-Module mit kristallinem Silizium; mittlere zwei Reihen mit Ornamenten: Module mit organischer PV; die unteren drei Reihen stammen aus dem Vorgängervorhaben.*

Gebäudedächer und -fassaden eignen sich hervorragend für die Integration von Photovoltaik (Bauwerkintegrierte Photovoltaik, BIPV). Ihr Flächenpotenzial übersteigt sogar den Bedarf der Energiewende, sie liegen verbrauchsnahe und ihre Nutzung ist ohne weitere Flächenversiegelung möglich. Die Ausbaugeschwindigkeit der BIPV ist aktuell allerdings zu gering, um maßgeblich zum Gelingen der Energiewende beizutragen.

Das Projekt »Standard-BIPV-System« zielt deshalb darauf ab, den Einsatz von Fassaden-BIPV zu erleichtern und so deren Verbreitung zu beschleunigen. Im Fokus steht insbesondere der Gebäudebestand. Das Projekt wird vom Fraunhofer ISE in Kooperation mit sechs Partnern aus Industrie und Forschung durchgeführt.

### Kontakt

Dr.-Ing. Jan-Bleicke Eggers  
Telefon +49 761 4588-2067  
jan-bleicke.egg@ise.fraunhofer.de

**Das Projekt »Standard-BIPV-System« wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) gefördert.**

Marktübliche PV-Module für Aufdachanlagen sind in ihren Abmessungen selten kompatibel mit den im Gebäudebestand benötigten Maßen und sie erfüllen meist auch nicht die bauordnungsrechtlichen Anforderungen in der Fassade. Vor allem aber stellt der Aufwand für Planung und Montage bisheriger BIPV-Fassadenlösungen eine Hürde für deren Einsatz dar. Wichtige Aspekte hierbei sind die elektrische Verschaltung der Module und die Toleranz gegenüber (Teil-)Verschattung. Das Projekt adressiert die Herausforderungen durch die Entwicklung einer BIPV-Fassadenlösung, bei der zum einen die Größe der BIPV-Module verringert und besser auf die Anforderungen abgestimmt ist. Zum anderen wird die elektrische Komplexität reduziert, indem zwei oder vier BIPV-Module mit einem Modulwechselrichter zu einer elektrischen Einheit verschaltet werden. Die Einheit wird direkt an das Wechselstromnetz des Gebäudes angeschlossen. Diese Modularisierung erleichtert die Planung und Montage der PV-Anlage und es kann vielfach auf aufwendige Einstrahlungs- und Verschattungssimulationen verzichtet werden.

Die Module haben eine Größe von 1 m x 1,2 m und werden wahlweise mit PV-Zellen aus kristallinem Silizium oder aus organischer PV bestückt. Als Trägermaterial werden Stahlkassetten und Mineralfaserplatten untersucht – beides im Fassadenbau bewährte und bekannte Materialien. Die Oberfläche der PV-Zellen ist durch ein Frontglas geschützt. Die Materialwahl erlaubt architektonisch hochwertige, rahmenlose Module. Für die Unterkonstruktion wird auf bewährte Fassadenlösungen zurückgegriffen. Dadurch kann die Solaranlage in eine konventionelle Fassade eingebunden, der Genehmigungsaufwand reduziert und der PV-spezifische Mehraufwand bei der Montage verringert werden. Für die elektrische Verschaltung kommen speziell entwickelte, vierpolige Solarkabel mit eigenem Stecker zum Einsatz. Sie erlauben es, die Bypassdioden – vom Modul weg – in den Hinterlüftungsraum der Vorhangfassade zu verlegen, deren Temperatur zu senken und die Leistungselektronik zusammen mit dem Wechselrichter zu bündeln.

Wir haben das Konzept anhand eines mobilen Demonstrators sowie an einer realen Bestandsfassade beim Fraunhofer ISE auf Eignung geprüft. Die Rückmeldungen zum Demonstrator wie auch die Erfahrungen an der Bestandsfassade zeigen, dass die Grundidee trägt. Weitere Verbesserungspotenziale und -lösungen wurden identifiziert und werden in Folgeprojekten erforscht.

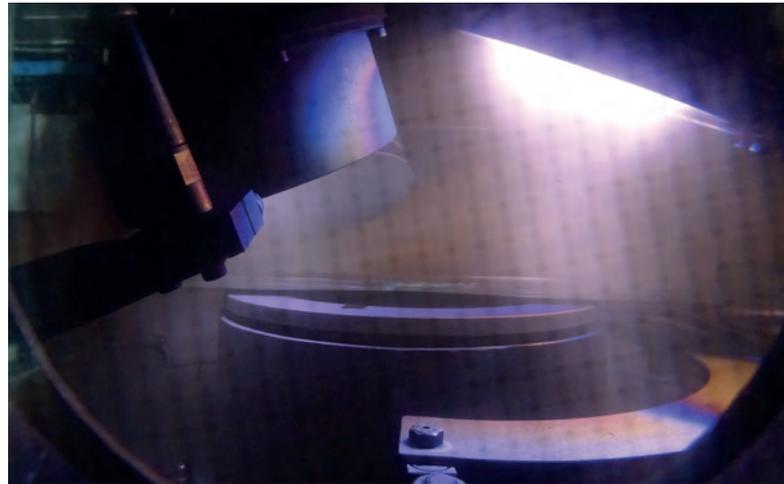
## Korrosionsschutzschichten für Bipolarplatten und »Porous Transport Layers« in der PEM-Elektrolyse

Auf der Anodenseite eines Polymerelektrolytmembran-Elektrolyseurs treten stark korrosive Bedingungen auf. Daher werden die eingebauten Bipolarplatten (BPP) und der »Porous Transport Layer« (PTL) in der Regel aus Titan gefertigt. Titan sorgt dafür, dass das Bauteil korrosionsbeständiger wird. Die sich bildende Passivierungsschicht führt allerdings zu Kontaktwiderständen, die die Leistungsfähigkeit der Elektrolyse-Zelle reduzieren. Daher wird derzeit häufig Platin als Korrosionsschutzschicht eingesetzt, was den Kontaktwiderstand niedrig hält. Diese Beschichtung ist aber momentan aufgrund der hohen Materialkosten und den nicht optimierten Fertigungsprozessen teuer.

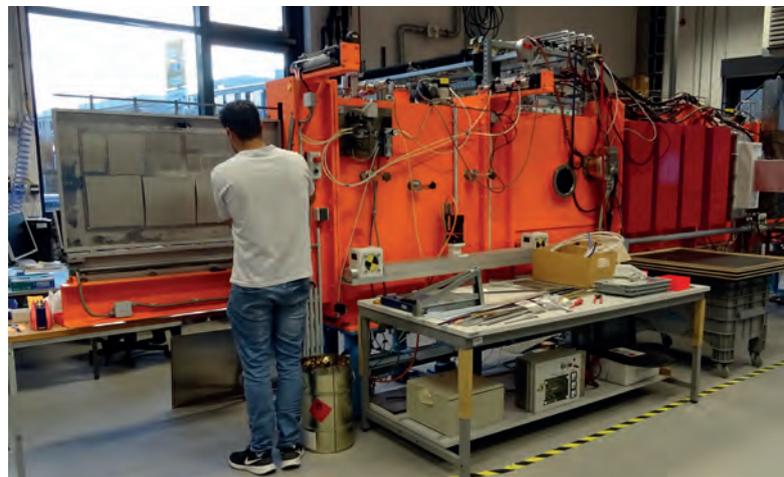
Am Fraunhofer ISE forschen wir im Rahmen des Vorhabens »HyThroughGen« an kostengünstigen Materialalternativen. Ein Ansatz ist die Verwendung von Mischungen aus Edelmetallen und Nichtedelmetallen. Hierzu haben wir ein Verfahren entwickelt, das ein schnelles Screening von Materialmischungen erlaubt. Dies geschieht durch Ko-Sputtern: dem Zerstäuben von zwei Sputter-Quellen auf ein Titan-Substrat (Abbildung rechts oben). Dadurch entsteht auf dem Substrat eine Schicht, deren Zusammensetzung sich entlang des Substrates unterschiedlich ausbildet. Im Folgenden kann dieses Substrat in einem Schritt anodisch oxidiert werden und die Zusammensetzung als auch der Kontaktwiderstand in Abhängigkeit von der Position auf dem Substrat bestimmt werden. Die anodische Oxidation bildet dabei die korrosiven Verhältnisse in der Elektrolyse-Zelle nach.

In einem Beispiel einer Materialmischung konnten wir zeigen, dass eine Beimischung des Nicht-Edelmetalls von 50 % zu dem gleichen Kontaktwiderstand nach anodischer Oxidation führt, wie das reine Edelmetall. Demnach ließe sich die Hälfte des Edelmetalls einsparen. Weitere Materialmischungen, auch Materialien ohne Edelmetalle, untersuchen wir aktuell.

Neben der Materialzusammensetzung optimieren wir auch den Beschichtungsprozess. Dabei betrachten wir im Rahmen des Vorhabens »PEP.IN« die Prozesskette beginnend mit der Substratreinigung, einem Beschuss des Substrates mit Argon-Ionen unmittelbar vor der Beschichtung und den Beschichtungsprozess selbst. Bisherige Ergebnisse geben uns Hinweise darauf, welche Prozessparameter im Detail von besonderer Relevanz sind, und zeigen auf, wie Prozesszeiten deutlich verkürzt werden können. Zudem entwickeln wir Methoden der Prozesskontrolle und der Qualitätssicherung. Insbesondere arbeiten wir an ex situ-Korrosionstests für beschichtete BPP und PTLs.



Herstellung von Gradienten-Misch-Schichten durch Ko-Sputtern.



Vorbereitung einer PTL-Beschichtung an einer Sputteranlage.

**Die Projekte »HyThroughGen« und »PEP.IN« werden vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.**

### Kontakt

Dr. Andreas Georg  
Telefon +49 761 4588-5993  
andreas.georg@ise.fraunhofer.de



## Eine nationale Wasserstoffstrategie für die Vereinigten Arabischen Emirate



Skyline von Abu Dhabi, Vereinigte Arabische Emirate.

Die Vereinigten Arabischen Emirate (VAE) haben eine nationale Wasserstoffstrategie entwickelt, mit der sie zwei wesentliche Ziele verfolgen: Zum einen bis 2031 zu den größten kohlenstoffarmen Wasserstoffproduzenten der Welt zu zählen, zum anderen bis 2050 mit Unterstützung der Wasserstoffindustrie die Dekarbonisierung der inländischen Industrie vorantreiben. Mit der Erstellung der Strategie beauftragte die Regierung der VAE das Beratungsunternehmen GHD Advisory und das Fraunhofer-Exzellenzcluster [Integrierte Energiesysteme \(CINES\)](#), dem auch das Fraunhofer ISE angehört.

Die VAE werden Wasserstoff in erster Linie für die Dekarbonisierung der heimischen Industrie verwenden – parallel dazu wird aber auch der globale Exportmarkt ausgebaut. Die VAE setzen sich für Wasserstoff-Hubs (»H<sub>2</sub>-Oasen«), begleitende politische Rahmenbedingungen und die Zusammenarbeit mit anderen Ländern in der Region ein, um das Wachstum der Wasserstoffindustrie zu fördern. Zudem werden Investitionen in Forschung und Entwicklung getätigt, die den Ausbau der Wasserstoffwertschöpfungskette unterstützen.

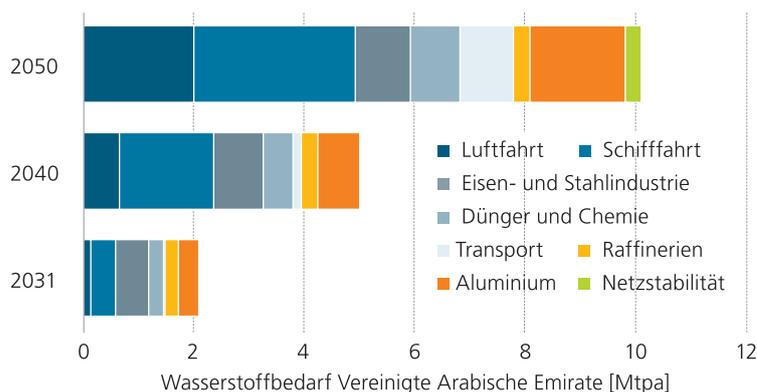
Dass die inländische Nachfrage nach Wasserstoff beträchtlich sein wird (Grafik unten), ist eines der Ergebnisse des Strategieprozesses, an dem alle wichtigen Wasserstoff- und Energie-Stakeholder im Land mitgewirkt haben. Angetrieben durch das Netto-Null-Ziel für 2050 sowie durch die weltweite Nachfrage nach Produkten wie »grünem« Stahl, nachhaltigem Flugbenzin und der Dekarbonisierung von schwer zu elektrifizierenden Industriesektoren, können die VAE bei der Entwicklung von Projekten vorangehen, da sie nicht – wie andere Länder – erst einen Markt für ihr Produkt etablieren müssen.

Die in der Strategie vorgeschlagenen Maßnahmen zielen darauf ab, bis 2031 jährlich 1,4 Millionen Tonnen kohlenstoffarmen Wasserstoffs zu produzieren, verteilt auf verschiedene Produktionswege. Gleichzeitig sollen Investitionen in die Wasserstoffforschung und -entwicklung bereitgestellt werden. Für die Jahre nach 2031 und auf dem Weg in eine dekarbonisierte Zukunft kommt Fraunhofer CINES zu der Einschätzung, dass die Produktionskapazität von kohlenstoffarmem Wasserstoff der VAE bis 2040 7,5 Millionen Tonnen pro Jahr und bis 2050 fast 15 Millionen Tonnen pro Jahr betragen könnte.

Neben der erwartbaren hohen inländischen Nachfrage nach Wasserstoff zieht das Autorenteam der Strategie den Schluss, dass die VAE eine sehr gute Ausgangsposition für Exporte hat: Das Land befindet sich in einer vorteilhaften geografischen Lage, um wichtige Märkte in Europa und Asien zu beliefern und verfügt über entsprechende Exportanlagen und Häfen. Dank großer Vorkommen an natürlichen Ressourcen, hoher Kapazitäten an erneuerbaren Energien, einem internationalen Handels- und Finanzzentrum sowie qualifizierten und innovativen Arbeitskräften sind die VAE für den Ausbau der kohlenstoffarmen Wasserstoffindustrie sowie den Export gut aufgestellt.

### Kontakt

Dr. Jan Frederik Braun  
Telefon +49 761 4588-2331  
jan.braun@ise.fraunhofer.de



Sektorspezifische Nachfrage nach kohlenstoffarmem Wasserstoff in den VAE von 2031 bis 2050.

# Along-the-Channel-PEM-Elektrolysezelle zur ortsaufgelösten Untersuchung von Massentransporteffekten

Großflächige Polymerelektrolytmembran-(PEM)-Elektrolyseure mit Membranflächen von mehreren 1000 cm<sup>2</sup> stellen hohe Anforderungen an das Wasser- und Thermomanagement in der Elektrolysezelle. Speziell entlang der Strömungskanäle (Along-the-Channel, AtC) zeigen sich inhomogene Zustände bezüglich des verbrauchten Wassers und der erzeugten Gase Wasserstoff und Sauerstoff. Um diese sogenannten Massentransportphänomene ortsaufgelöst untersuchen zu können, haben wir am Fraunhofer ISE eine segmentierte Along-the-Channel PEM-Elektrolyse-Testzelle entwickelt.

Die Entwicklung und Untersuchung der AtC-Zelle erfolgte im Projekt »StacIE«. Die am Projekt beteiligten Partner forschen an dem Scale-up und der Industrialisierung der PEM-Elektrolyse. Der Projektfokus liegt auf der Weiterentwicklung der Stack-Technologie für großvolumige Produktionskapazitäten.

Zur Analyse des Massentransports entlang des Strömungskanals einer PEM-Elektrolysezelle im industriell relevanten Maßstab haben wir eine AtC-Laborzelle mit einer Länge von 30 cm bei 2 cm Breite aufgebaut. Der erzeugte Wasserstoff und damit ebenfalls der Wasserverbrauch korreliert mit der aufgegebenen Stromstärke. Um möglichst anspruchsvolle Bedingungen zu realisieren, haben wir die Zelle bis zu einer Stromstärke von 600 A (10 A/cm<sup>2</sup>) ausgelegt und erfolgreich getestet. Damit können auch zukünftig erwartete Betriebspunkte mit sehr hoher Wasserstoffherzeugungsrates analysiert werden. Die Zelle ist für Untersuchungen bis 80 °C und 10 bar Differenzdruck geeignet. Mittels einer speziell konzipierten Messplatine können Messungen der Stromdichte- und Temperaturverteilung in 120 Messkontakten umgesetzt werden. Zusätzlich dazu

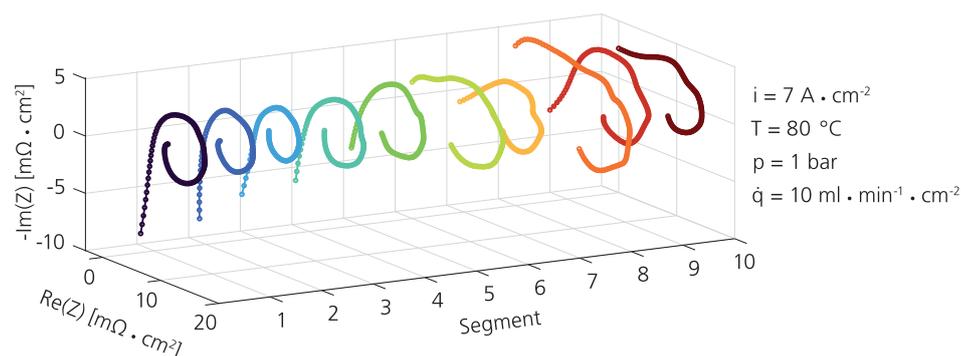
*Segmentierte Along-the-Channel-Testzelle zur Analyse lokaler Massentransportprozesse.*



ist die Zelle entlang der parallel verlaufenden Kanalstruktur durch Trennung des elektrischen Kontakts in zehn Segmente unterteilt. In jedem der Segmente und zusätzlich über die gesamte Laborzelle können simultan elektrochemische Impedanzspektren (EIS) aufgenommen werden. Zur Separation der Prozesse der beiden Halbzellen sind drei Referenzelektroden am Einlass, der Mitte und am Auslass der Zelle implementiert, mit denen das Membranpotenzial ermittelt werden kann. Die EIS stellen für diese Arbeit die geeignete Messmethodik zur Auftrennung der Polarisierungsprozesse, etwa der Massentransportprozesse, dar.

Im weiteren Verlauf des Projekts sollen Materialien in der AtC-Zelle charakterisiert werden, die auch in zukünftigen StacIE-Stackplattformen Verwendung finden. Dadurch wollen wir Erkenntnisse über die internen Prozesse entlang des Strömungskanals gewinnen. Des Weiteren wollen wir den Einfluss unterschiedlicher Strukturparameter poröser Transportschichten auf lokale Polarisierungsprozesse verstehen.

*Lokale elektrochemische Impedanzspektren (EIS) zur Analyse des Massentransports entlang der Zellsegmente.*



**Das Projekt »StacIE« wird im Rahmen des Leitprojekts »H2Giga« vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.**

## Kontakt

Niklas Hensle  
Telefon +49 761 4588-2033  
niklas.hensle@ise.fraunhofer.de



## Dimethylether als globaler Wasserstoffträger

Grüne, wasserstoffbasierte Moleküle spielen eine Schlüsselrolle bei der Defossilisierung des globalen Energiesystems. Aktuelle Prognosen zufolge sollen bis 2030 weltweit zwölf Millionen Tonnen Wasserstoff gehandelt werden. Eine offene Frage ist noch der Transport von Wasserstoff bei großen Entfernungen (mehr als 6000 km, z. B. von Perth oder Kapstadt nach Rotterdam), da dieser nicht über Wasserstoffpipelines erfolgen kann. Selbst mit energieintensiver Kompression oder Verflüssigung durch Kühlung ist die volumetrische Energiedichte von Wasserstoff gering und die Transportinfrastruktur noch nicht vorhanden.

Das Fraunhofer ISE hat das Potenzial von Dimethylether (DME) als vielversprechenden umweltfreundlichen Wasserstoffträger im Rahmen eines geschlossenen Kohlenstoffkreislaufs identifiziert. Hierbei wird DME aus CO<sub>2</sub> und Wasserstoff aus erneuerbaren Energiequellen synthetisiert und per Schiff in das Energieimportland transportiert. Dort kann aus DME mittels thermochemischer Reformierverfahren Wasserstoff erzeugt werden, der dann in Gasnetze und -pipelines eingespeist wird. Als Nebenprodukt fällt CO<sub>2</sub> an, das in verflüssigter Form im selben Schiff zurück zum Syntheseort transportiert wird und dort als Rohstoff für die Synthese dient. Somit entsteht ein geschlossener CO<sub>2</sub>-Kreislauf.

Im Vergleich mit alternativen Wasserstoffträgern wie Ammoniak oder flüssigen organischen Wasserstoffträgern (LOHC) bietet DME eine höhere technische Wasserstoffspeicherkapazität. Dadurch können das Schiffsaufkommen reduziert und die Transportkosten gesenkt werden. Weiterhin lässt sich das bei

der DME-Synthese als Nebenprodukt entstehende Wasser für die Elektrolyse nutzen. Im Vergleich zu Herstellung und Transport von kryogenem Wasserstoff kann der Wasserbedarf dadurch halbiert werden, was in den oft sonnenreichen und von Wasserknappheit betroffenen Regionen einen wesentlichen Vorteil darstellt. Neben der Nutzung als Wasserstoffträger ist DME ein hervorragender Kraftstoff und kann zudem als Basis für die Herstellung von nachhaltigem Flugkraftstoff (Sustainable Aviation Fuels) genutzt werden. Im Rahmen des Projekts »SAFari« untersuchen wir diesen Prozess im Detail.

Um die Effizienz der Prozesse zu erhöhen, soll die zur Patentierung angemeldete INDIGO-Technologie des Fraunhofer ISE zur Herstellung von DME eingesetzt werden. Das Verfahren vereinfacht den konventionellen Herstellungsprozess durch die Anwendung des Reaktivdestillationskonzepts bei milden Reaktionsbedingungen und den Einsatz alternativer Katalysatoren.

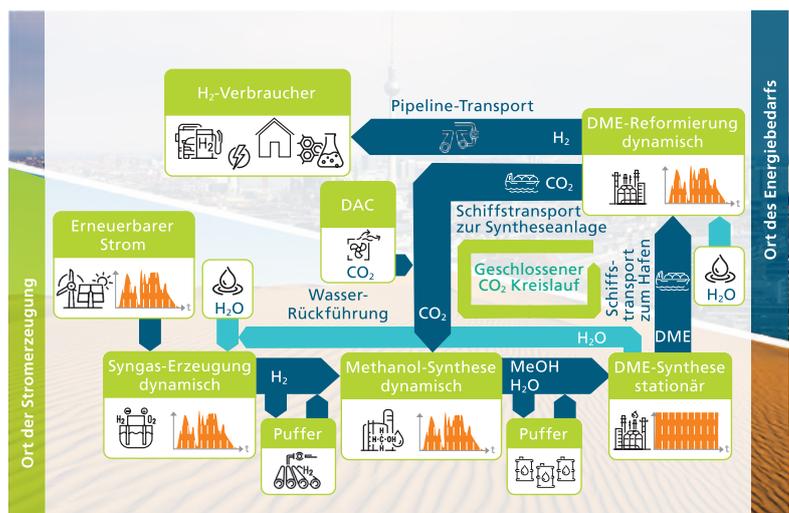
Auch die thermochemische Wasserstoffherzeugung aus DME erfolgt im Vergleich zu fossilbasierten Energieträgern wie Erdgas oder Erdölfraktionen bei moderaten Temperaturen. Zudem ist der Wärmebedarf des katalysierten, endothermen Reaktionsschritts der Reformierung um 25 % niedriger. Um die DME-Reformierung als Gesamtverfahren kommerziell zu nutzen, müssen neben der Katalyse auch Prozessschritte wie die Wärmeerzeugung aus CO<sub>2</sub>-armen Quellen (wie Strom und industrieller Restwärme), Wasserstoff-CO<sub>2</sub>-Trennverfahren und die Aufbereitung der Ausgangsstoffe wie die Verdampfung von Wasser und DME angepasst werden. Hierzu führen wir innerhalb des Projekts »Power-to-MeDME« experimentelle sowie theoretische Arbeiten am Fraunhofer ISE durch.

**Das Projekt »SAFari« wird vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert, das Projekt »Power-to-MeDME« vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF).**

*Geschlossener Kohlenstoff-Kreislauf mit Synthese von Dimethylether (DME) im Exportland und DME-Reformierung im Importland.*

### Kontakt

Florian Rümmele  
Telefon +49 761 4588-5365  
florian.ruemmele@ise.fraunhofer.de



## Leistung und Lebensdauer von Brennstoffzellen unter Verwendung von kontaminiertem Wasserstoff

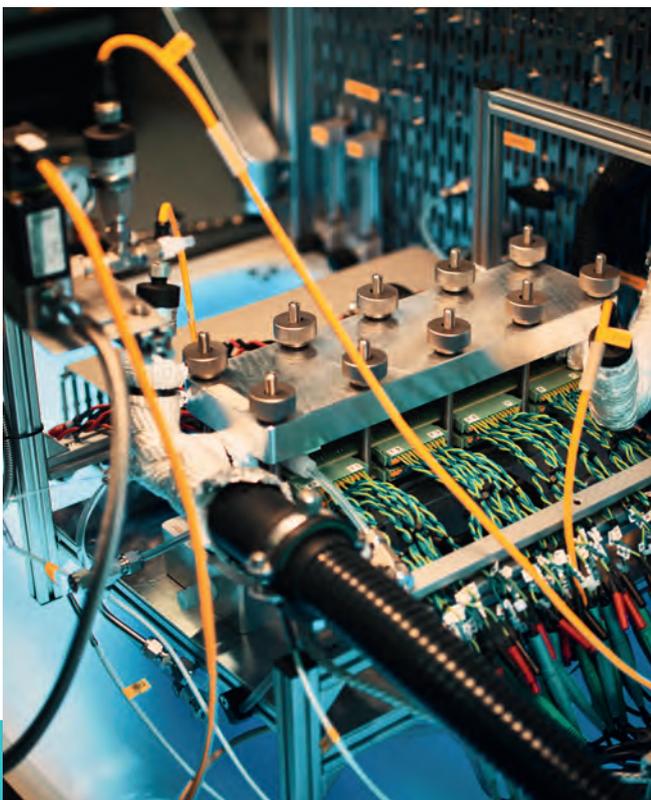
Wasserstoff für Brennstoffzellenfahrzeuge (FCEVs, engl. Fuel Cell Electric Vehicles) enthält je nach Produktions- und Transportverfahren Verunreinigungen wie z. B. Kohlenwasserstoffe, die die Effizienz und Lebensdauer von Brennstoffzellen beeinflussen. Die Wasserstoffqualitätsnorm ISO 14687-2 enthält daher Vorgaben zu maximal erlaubten Konzentrationen entsprechender Schadstoffe. Diese Grenzwerte werden in umfassenden Tests ermittelt und in verbindliche, nationale Vorschriften für Wasserstofftankstellen eingearbeitet. Sind die Anforderungen an die Reinheit des Wasserstoffs hoch, steigen die Gestehungskosten des Wasserstoffs und somit die Betriebskosten von FCEVs. Sind die Anforderungen hingegen gering und die Schadstoffkonzentrationen hoch, können im schlimmsten Fall irreversible Schädigungen der Brennstoffzelle auftreten.

Wir führen im Projekt »H2Fuel« pränormative Forschungsarbeiten mit verunreinigtem Wasserstoff an aktuellen sowie zukünftigen Brennstoffzellenkonfigurationen durch, um eventuelle Anpassungen der ISO 14687-2 zu begründen. Nutzungsdaten von FCEVs zeigen, dass häufige Lastwechsel – die sich z. B. über den sog. Fuel Cell Dynamic Load Cycle simulieren lassen – sowie die Dauer zwischen Stopp und Neustart eines FCEV die Regeneration nach einer Kontamination unterstützen. So tragen längere Fahrpausen – z. B. nach Abstellen des Fahrzeugs über Nacht – dazu bei, dass sich Brennstoffzellen von einer hohen Kontamination mit Kohlenmonoxid erholen

können. Dies geschieht, wenn das System auf Umgebungstemperatur abkühlt und Wasser kondensiert oder Gas zwischen den Elektroden diffundiert: Das Katalysatorgift kann nun an der betroffenen Elektrode oxidieren. Dieser Effekt wiederum könnte zusammen mit Betriebsweisen, die an verunreinigten Wasserstoff angepasst sind, für eine Entschärfung des Grenzwerts sprechen.

Allerdings verfolgen Brennstoffzellenhersteller aus Kostengründen häufig das Ziel, die in Brennstoffzellen enthaltene Platinmenge je Stack zu verringern, was sich negativ auf die Schadstofftoleranz des Systems auswirken kann. Effizienzverluste und irreversible Schädigungen der Elektroden treten stärker in Erscheinung, wenn nur ein kleiner Puffer gegen den Verlust aktiver Katalysatoroberflächen zur Verfügung steht. Für Wasserstoffverunreinigungen gilt daher, die jeweiligen Konzentrationen auf ein so geringes Level zu begrenzen, dass keine irreversible Degradation auftritt.

In unseren Versuchsreihen konnten wir Schadstoffgruppen identifizieren, die solche unerwarteten, irreversiblen Degradationseffekte hervorrufen. Mittels angepasster Versuchsprotokolle und Zellaufbauten für ortsauflösende Tests untersuchen wir Betriebsweisen, die die kontaminationsbedingte Degradation verstärken, um diese Schädigungen noch präziser in der Brennstoffzellenebene zu lokalisieren.



**Das Projekt »H2Fuel« wurde vom Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV) gefördert.**

*Zellplattform für Untersuchungen zu lokalen Kontaminationseffekten.*

### Kontakt

Sebastian Prass  
Telefon +49 761 4588-5310  
sebastian.prass@ise.fraunhofer.de



## Transformationspfade zur Dekarbonisierung des Wärmesektors: ein Bottom-up-Ansatz

Welche Rolle wird Wasserstoff in der zukünftigen Energieversorgung spielen? Werden wir mit Wasserstoff heizen? Falls ja, lässt sich dadurch der Ausbaubedarf der Stromverteilnetze reduzieren? Und wird die kommunale Wärmeplanung die Dekarbonisierung des Wärmesektors vorantreiben? Diese und damit verbundene Fragen haben Forscherinnen und Forscher des Fraunhofer ISE und des Fraunhofer IEE in einer [Studie im Auftrag des Nationalen Wasserstoffrats](#) beantwortet. Dabei haben sie erstmals einen Bottom-up-Ansatz gewählt, mit dem sie vier Versorgungsgebiete in Burg bei Magdeburg, Fellbach, Mainz und Westerstede detailliert modelliert haben.

Für jede der vier Fallstudien wurden die Gegebenheiten wie Gebäudebestand, Strom-, Gas und Wärmenetze, aktuelle Strom- und Gasverbräuche, bestehende Kraftwerke sowie Flächen und Potenziale für Photovoltaik, Solarthermie und Geothermie sowie Wärmequellen und deren Potenziale für (Groß-)Wärmepumpen berücksichtigt. Mit dem regionalen, intersektoralen Energiesystemmodell [DISTRICT](#) des Fraunhofer ISE haben wir für die vier Fallbeispiele fünf Szenarien modelliert. Jedes Szenario setzt die Erreichung der Klimaziele voraus und ist abhängig von Variablen wie Preisentwicklungen, Verfügbarkeit von Technologien, Infrastruktur, die lokale Situation von Handwerksbetrieben und Sanierungsraten.

Über alle Szenarien hinweg zeigt sich, dass der Ausbau von Wärmepumpen die erfolversprechendste Strategie zur Dekarbonisierung der Raumwärme ist. Insbesondere sind Wärmepumpen die einzige verfügbare Option, die gesteckten

Klimaziele für das Jahr 2030 zu erreichen. Aber auch über das Jahr 2030 hinaus stellen sie in jedem Szenario die beste Lösung für eine dezentrale Raumwärmeerzeugung dar.

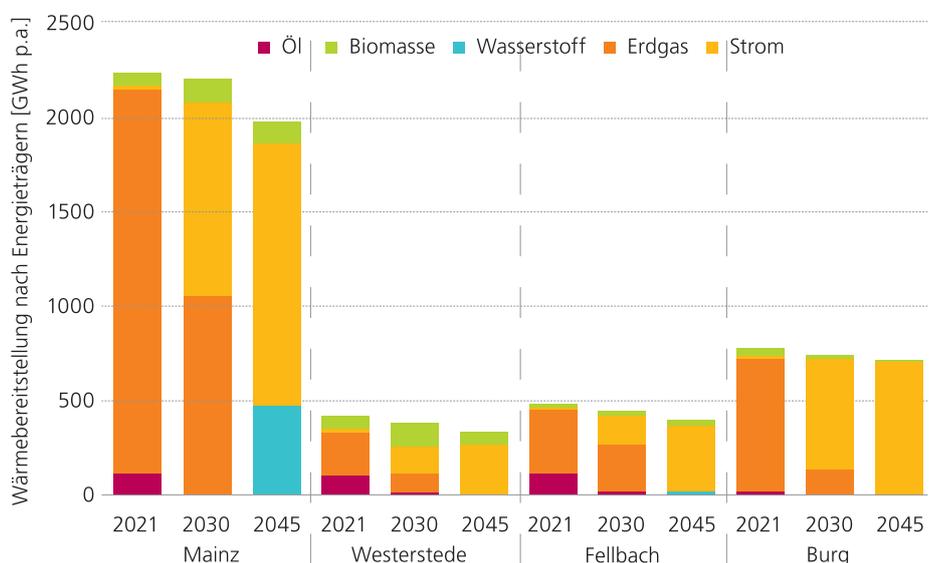
Im Bereich Fern- und Prozesswärme legen die Szenarien den Schluss nahe, dass sich ein Mix aus Großwärmepumpen, die unterschiedliche Wärmequellen nutzen, mit Wasserstoff betriebene Kraft-Wärme-Kopplung und weitere erneuerbare Technologien wie Solarthermie, Geothermie und Biomasse durchsetzen wird. Die Technologieauswahl hängt dabei stark von der lokal verfügbaren Wärmequelle ab. Über alle Szenarien hinweg zeigt sich das Potenzial von Wasserstoff als Energiequelle primär in der Fern- und Prozesswärme.

Die Analyse der lokalen Netze hat ergeben, dass in allen betrachteten Szenarien und Gebieten die Stromnachfrage erheblich ansteigen wird und ein Stromnetzausbau notwendig ist, unabhängig vom Anteil der Wasserstoffnutzung im Gebäudesektor. Die Modellkette des Fraunhofer ISE und des Fraunhofer IEE konnte diverse Fragen unterschiedlicher Betrachtungstiefen beantworten und damit einen erheblichen Beitrag zur Debatte um die Dekarbonisierung des Wärmesektors leisten. Die Bedarfsanalyse der vier gewählten Städte offenbart, wie komplex die Transformation des Wärmesektors im stadt-spezifischen und lokalen Umfeld ist. Zudem verdeutlicht sie die Notwendigkeit einer integrierten Energieleitplanung, um die Dekarbonisierung über alle Sektoren und Stromnetze auf den Weg zu bringen.

*Transformation der Wärmeerzeugung in den vier Betrachtungsgebieten im Szenario Elektrifizierung (Sz 2 in der Studie) nach Energieträgern.*

### Kontakt

Dr. Jessica Thomsen  
Telefon +49 761 4588-5079  
jessica.thomsen@ise.fraunhofer.de



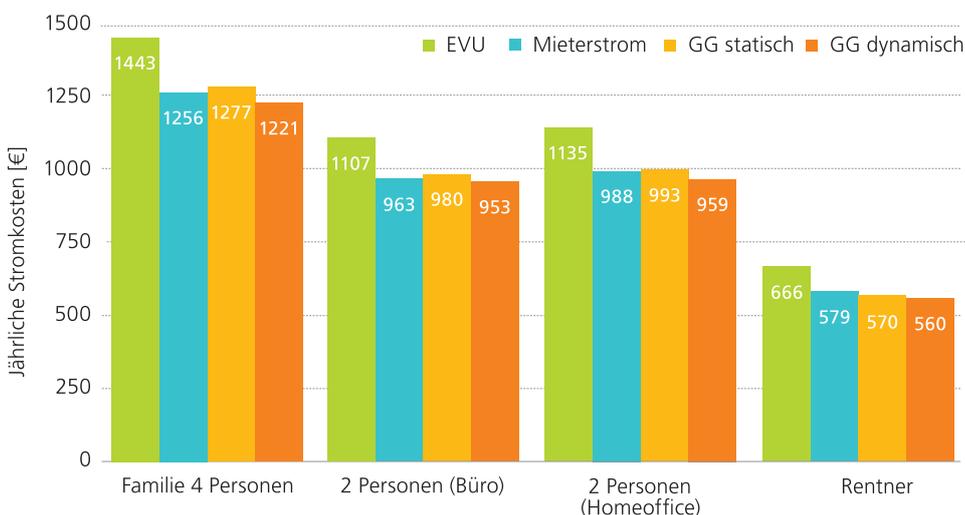
## Gemeinschaftliche Gebäudeversorgung: die Wirtschaftlichkeit von Vor-Ort-Systemen im Vergleich

Für die Bewohnerinnen und Bewohner der 21 Millionen Mehrfamilienhäuser (MFH) in Deutschland ist eine aktive Beteiligung an der Energiewende zurzeit nur begrenzt möglich. Die Bundesregierung will dies ändern und schlägt ein Modell zur einfacheren Solarstromversorgung von Mehrfamilienhäusern vor: Durch die sogenannte Gemeinschaftliche Gebäudeversorgung (GG) kann Dachsolarstrom in Mehrfamilienhäusern künftig direkt an die Mietparteien des Hauses weitergegeben werden. Die Verteilung des erzeugten PV-Stroms erfolgt anhand eines vereinbarten Aufteilungsschlüssels, für die Reststromversorgung schließt jede Partei einen individuellen Stromvertrag mit einem Energieversorgungsunternehmen (EVU) ab. Somit entfällt bei der GG im Vergleich zum Mieterstrommodell aus Betreibersicht die Lieferantspflicht. Die Neuregelung verspricht insgesamt einen geringeren bürokratischen Aufwand.

In einer Case Study in einem MFH mit vier Parteien haben wir am Fraunhofer ISE vier Stromversorgungsmodelle auf ihre Wirtschaftlichkeit hin untersucht:

1. Volleinspeisung: PV-Anlageneigentümer speist vollständig ein; die Mietparteien beziehen ihren Strom von einem EVU.
2. Mieterstrom: PV-Anlageneigentümer verkauft den Strom an die Mietparteien.
3. Statische GG: PV-Anlageneigentümer vermietet Anlagenanteile an Mietparteien (paritätische Verteilung des PV-Stroms).

*Jährliche Stromkosten in einem Mehrfamilienhaus mit vier Parteien: Familie mit vier Personen, zwei Arbeitnehmende (in Vollzeit im Büro), zwei Arbeitnehmende (im Homeoffice) und ein Rentner-Haushalt.*



4. Dynamische GG: PV-Anlageneigentümer vermietet Anlagenanteile an Mietparteien (Verteilung des PV-Stroms anhand des individuellen Verbrauchs).

Aus Sicht des Anlagenbetreibers sind alle Modelle rentabel – den geringsten bürokratischen Aufwand verursacht die Volleinspeisung. Damit der erwünschte Wechsel weg von der Volleinspeisung für den Betreiber attraktiv wird, haben wir eine Wirtschaftlichkeitsberechnung unter folgender Annahme erstellt: Gewinnsteigerung von 15 % für den PV-Anlageneigentümer bei Mieterstrom sowie bei statischer und dynamischer GG gegenüber der Volleinspeisung. Unter dieser Annahme ergibt sich für die Bewohnenden ein Preisvorteil bei Mieterstrom und GG im Vergleich zum reinen Strombezug vom EVU. Die jährlichen Kosten für die Bewohnenden unterscheiden sich zwischen Mieterstrom und GG nur geringfügig. Die günstigsten Konditionen erzielt die GG mit einem dynamischem Aufteilungsschlüssel, da hier die Verteilung der Anteile für einen maximalen Eigenverbrauch sorgt und die zusätzlichen Kosten für Abrechnung und Vertrieb des Mieterstrommodells entfallen.

Die Jahressimulation basiert auf Lastprofilen, die wir am Fraunhofer ISE mithilfe des Analysetools »SynPRO« generiert haben. Insgesamt zeigt die Untersuchung, dass die GG ein vielversprechendes Konzept ist, um MFH-Bewohnende aktiv in die Nutzung von selbst erzeugtem Solarstrom einzubeziehen. Finanziell ist das Modell für alle Parteien attraktiv und kann helfen, die gesteckten PV-Ausbauziele zu erreichen.

### Kontakt

Paula Oberfeier  
 Telefon +49 761 4588-2220  
 paula.oberfeier@ise.fraunhofer.de



## Dekarbonisierung der Energieversorgung von Liegenschaften

Eine dekarbonisierte Energieversorgung wird für Unternehmen immer wichtiger – nicht nur im Kontext von steigenden Energiepreisen und Versorgungsengpässen. Unternehmen können den Weg in Richtung Klimaneutralität beschreiten, indem sie ihre Energieverbräuche und Emissionen erheben und kontrollieren sowie gezielte Maßnahmen zur Emissionsreduktion ergreifen.

Inzwischen existieren viele Standards zu Entwicklung, Erreichung und Überprüfung von Dekarbonisierungszielen. Wir haben diese im Auftrag des Umweltbundesamts (UBA) untersucht und bewertet. Dabei erarbeiteten wir zentrale Bausteine für glaubwürdige Klimaziele aus kurz-, mittel- und langfristiger Perspektive sowie für eine umfassende unternehmerische Emissionsbilanz. Die Kompensation von Emissionen sollte bei der Erreichung der Dekarbonisierungsziele stets die letzte Wahl darstellen. Für den Bereich der Energieversorgung empfiehlt sich die Entwicklung von Transformationspfaden, die es erlauben, Zwischenziele zu identifizieren und somit Entscheidungsgrundlagen für den Umbau des Energiesystems zu liefern.

Die durchgeführten Projekte zeigen insgesamt sehr unterschiedliche Anforderungen an die Energieversorgung industrieller und gewerblicher Liegenschaften. Um diese zu beurteilen sowie die Möglichkeiten eines nachhaltigen Umbaus aufzuzeigen, ist der erste Schritt die Bestandsaufnahme aktueller Verbräuche, Bedarfe und Erzeugungspotenziale auf dem Betriebsgelände. Dabei identifizieren wir neben den absoluten Verbräuchen insbesondere die erforderlichen Temperaturen in der Wärme- und Kältebereitstellung. Auch notwendige

Spitzenleistungen und Möglichkeiten zur Abwärmenutzung fließen in die Bestandsaufnahme ein. Dabei kommen unterschiedliche Tools zum Einsatz – so wird das Abwärmepotenzial von Industrie- und Gewerbeeinheiten z. B. mithilfe der PINCH-Analyse erfasst. Auch werden die in der Liegenschaft vorhandenen Potenziale zur Erzeugung erneuerbaren Stroms und Wärme ermittelt. Auf dieser Grundlage werden Transformationspfade entwickelt, die abhängig von Szenarien für die Entwicklung von Energiepreisen und anderen Rahmenbedingungen unterschiedlich ausfallen. Im Bereich der Prozesswärme ist die Wahl der Versorgungstechnologie besonders abhängig vom benötigten Temperaturniveau. Für den Bereich unter 200 °C kommen beispielsweise Hochtemperaturwärmepumpen in Frage. Sind höhere Temperaturen notwendig, gibt es die Möglichkeit der Direktelektrifizierung sowie eines Umstiegs auf CO<sub>2</sub>-freie Kraftstoffe wie Wasserstoff oder synthetische Gase.

Unsere Fallstudien, darunter zu Liegenschaften der PUCARO Elektroisierstoffe GmbH in Roigheim, zeigen, dass das Potenzial der Photovoltaikstromerzeugung möglichst frühzeitig erschlossen werden muss. Auch muss langfristig ein vollständiger Umbau der Wärmeversorgung erfolgen, um eine Dekarbonisierung zu erreichen. Um ihren Bedarf an Reststrom zu decken, könnten Unternehmen vorübergehend auf Direktlieferverträge zurückgreifen. Insgesamt stellt der Vergleich von möglichen Transformationspfaden eine gute Möglichkeit dar, Preisrisiken und deren Auswirkungen auf Investitionsentscheidungen sichtbar zu machen.

*PV-Anlagenflächen der PUCARO Elektro-Isolierstoffe GmbH am Standort Roigheim  
Bildquelle: Google, Bilder © 2023 AeroWest, GeoBasis-DE/BKG, Maxar Technologies,  
Kartendaten © 2023 GeoBasis-DE/BKG (©2009).*

- Dachinstallierte PV-Anlage    ■ Freiflächen-PV
- Bodennahe Freiflächen-PV    ■ Bereits installierte Anlagen



### Kontakt

Dr. Jessica Thomsen  
Telefon +49 761 4588-5079  
jessica.thomsen@ise.fraunhofer.de

# Veranstaltungen 2024 mit Beteiligung des Fraunhofer ISE

## Januar

Batterieforum Deutschland	Berlin	24. – 26.01.2024	SNEC Photovoltaic Power		
SPiE Photonics West	San Francisco, USA	27.01. – 01.02.2024	Conference & Exhibition	Shanghai, China	11. – 15.06.2024

## Februar

e-world Energy & Water	Essen	20. – 22.02.2024	The Battery Show Europe	Stuttgart	18. – 20.06.2024
World Hydrogen MENA	Dubai, Vereinigte Arabische Emirate	26. – 29.02.2024	The smarter E Europe	München	18. – 21.06.2024
39. PV-Symposium	Bad Staffelstein	27. – 29.02.2024	42 <sup>nd</sup> International Energy Workshop	Bonn	26. – 28.06.2024
			tandemPV Workshop	Amsterdam, Niederlande	26. – 27.06.2024

## März

LOPEC	Neuchâtel, Schweiz	05. – 07.03.2024	5 <sup>th</sup> International Conference on Solar Technologies & Hybrid Mini Grids	Palma de Mallorca, Spanien	04. – 06.09.2024
PVinMotion	München	06. – 08.03.2024	PSCO	Oxford	16. – 18.09.2024
International Battery Seminar	Orlando, USA	12. – 15.03.2024	EU PVSEC	Wien, Österreich	23. – 27.09.2024

## April

SiliconPV	Chambéry, Frankreich	15. – 19.04.2024	EUMETSAT Meteorological Satellite Conference	Würzburg	30.09. – 04.10.2024
Berliner ENERGIETAGE	Online	16. – 18.04.2024			
CO <sub>2</sub> -based Fuels and Chemicals Conference	Köln	17. – 18.04.2024			
Hannover Messe	Hannover	22. – 26.04.2024			
OWPT Conference	Yokohama, Japan	23. – 26.04.2024			

## Mai

World Hydrogen Summit & Exhibition	Rotterdam, Niederlande	13. – 15.05.2024	FVEE Jahrestagung	Berlin	08. – 09.10.2024
HOPV24	Valencia, Spanien	13. – 15.05.2024	hy-fcell	Stuttgart	08. – 09.10.2024
34. Symposium Solarthermie und Innovative Wärmesysteme	Bad Staffelstein	14. – 16.05.2024	Chillventa	Nürnberg	08. – 10.10.2024
Berliner ENERGIETAGE	Berlin	15. – 16.05.2024	SolarPACES	Rom, Italien	08. – 11.10.2024
EMRS Spring Meeting	Straßburg, Frankreich	27. – 31.05.2024	eMove360° Europe	München	15. – 17.10.2024
			Glasstec	Düsseldorf	22. – 25.10.2024
14 <sup>th</sup> IIR Conference on Phase-Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning	Paris, Frankreich	29. – 31.05.2024	11. Solarbranchentag	Stuttgart	tba

## Juni

Enerstock	Lyon, Frankreich	05. – 07.06.2024			
4 <sup>th</sup> Terawatt Workshop	Asilomar CA, USA	06. – 08.06.2024			
52 <sup>nd</sup> IEEE Photovoltaic Specialists Conference	Seattle, USA	09. – 14.06.2024			
ACHEMA	Frankfurt am Main	10. – 14.06.2024			
AgriVoltaics	Denver, USA	11. – 13.06.2024			
PCIM Europe	Nürnberg	11. – 13.06.2024			

## September


## Oktober


## November


## Dezember


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

Marie-Sophie Himmerich, Tobias Mickler  
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, 2024

## 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)

✉️ X: FraunhoferISE

🌐 LinkedIn: [fraunhofer-ise-freiburg](https://www.linkedin.com/company/fraunhofer-ise-freiburg)

📺 YouTube: FraunhoferISE-official

## Konzeption und Gestaltung

netsyn, Freiburg

## Druck

Burger Druck GmbH, Waldkirch

# Bildnachweise

---

## Copyrights

Fraunhofer-Allianz Energie: Seite 14  
INATECH/Albert-Ludwigs-Universität Freiburg: Seite 15  
Fraunhofer-Gesellschaft: Seite 17  
badenova: Seite 21  
iStock.com/Kateryna Novokhatnia: Seite 29  
ESA/NASA: Seite 66  
Fraunhofer ISE/Fraunhofer IWM: Seite 67  
Viega GmbH & Co. KG: Seite 72  
Bundesverband Wärmepumpe (BWP) e.V.: Seite 76  
iStock/boule13: Seite 80  
Friedrich-Alexander-Universität Erlangen: Seite 82

Das Copyright aller anderen Bilder liegt beim Fraunhofer ISE.

## Fotografen

Michael Eckmann: Seite 68  
Joscha Feuerstein: Seite 81  
Myriam Kaiser: Seite 49  
Guido Kirsch: Seite 10  
Dirk Mahler: Titelbild, Seiten 2, 8 (Bett, Henning, Glunz, Preu, Schossig), 24, 25, 31, 33, 35, 37, 39, 41, 43, 45, 46, 48, 49, 50, 51, 56, 58, 69, 73, 81  
Bernd Schumacher: Seiten 4, 8 (Wittwer, Vormfelde)  
Nils Theurer: Seite 22  
Kai-Uwe Wudtke: Seite 8 (Wirth)



**Fraunhofer-Institut für  
Solare Energiesysteme ISE**  
Heidenhofstraße 2  
79110 Freiburg

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



Jahresbericht 2023/24

